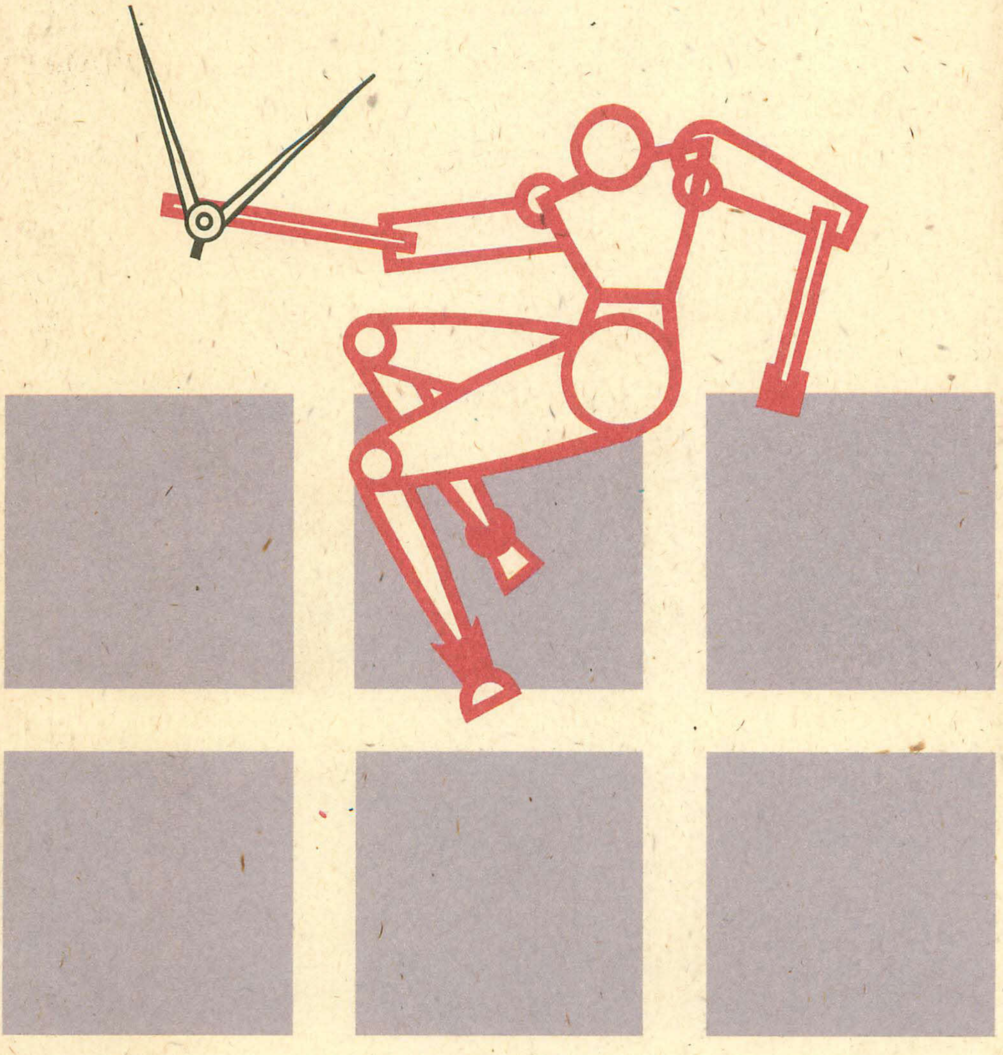
東京大学工学セミナー

工学における設計

猪瀬 博 編



東京大学出版会

■装幀　富岡義人

東京大学工学セミナー

工学における設計

猪瀬 博 編

東京大学出版会

はしがき

東京大学は，開かれた大学への要望に応えるべく，学内の諸般の研究活動を広く学外の方々に紹介する努力を重ねてきた．全学的なレベルではこれまでに，情報や新素材に関する国際シンポジウムが開催されているが，工学部の教官はその中で主要な役割を担ってきている．また東大フォーラムの第1回として，工学部が主催し「化合物半導体」についてのかなり専門的な発表と討論も行った．

一方，財団法人総合研究奨励会は，永年東京大学における工学の振興を目的として活動してきたが，東京大学工学部と協力して，「東京大学工学セミナー」を企画し，その第1回として，昨年秋に「工学諸分野における設計」という統一テーマをとりあげた．このセミナーの趣旨は，東京大学工学部における種々の分野での研究の内容を広く学外の方々に知っていただくとともに，日頃社会に直接に貢献しておられる学外の方々との意思の疎通をはかり，その御意見をとり入れながら今後の研究を推進し，工学の発展にいっそうの寄与を果したい，ということである．そして本書は，そのセミナーにもとづき，より多くの方々にその内容を紹介しようというものである．

「設計」は，工学にとってまさに中心的な課題である．工学においては，つねに社会のニーズに貢献しようという動機をもち，その目的を達成するために，綿密な計画をたて，広範囲な知見を総動員してその実現をはかることが要請される．分析は工学においても不可欠の要因ではあるが，分析結果をフィードバックすることによって合成が行われるとき，はじめて設計は成就する．「設計」

とは，このような新たなるものの合成ないし創造を目的とする種々の知的活動の総称といってよい．

設計の対象となるものは，材料やデバイスなどのきわめて微細なものから，巨大な建造物に至るまで，きわめて多様であるが，対象のいかんにかかわらず，設計の重要性は工学において普遍的である．これはつねに社会のニーズに応えて発展を続ける工学という学問分野がもつ，他に類例のない特色ということができよう．

工学の各分野においては，それぞれに設計に関する永年の知見が集積されており，その手法は，個々の分野の歴史と特質を反映して，多様なものがある．しかしながら昨今は工学の諸分野には顕著な入り組み現象が見受けられ，これまで相互にあまり関連をもたなかった分野間に，密接な関連が生ずるようになっている．その結果，従来関連が希薄と見られていた他の分野における設計手法が，自己の分野にとってきわめて有用と見なされる事例がしばしば生ずるようになってきた．工学における設計手法にも学際性が高まってきているといえよう．

このような見地から今回は，工学セミナーの第1回として，工学の諸分野を横断的にとりあげて，どのような設計手法が採用されているのかを広く見渡してみることとした．材料やデバイスのようなミクロなものから，船とか建築物のようなマクロなものまでを対象として，工学における諸設計手法の共通点は何か，相違点は何か，他分野に何を学び，自らはどの方向へ進んでいくのか，といった問題を，読者の方々とともに考えていきたいと思う．

終りに，本セミナーの企画・編集に当り，多大の御尽力をいただいた東京大学工学部総合試験所秋山宏助教授はじめ，関係者の方々に厚くお礼申し上げる次第である．

1987年3月

東京大学工学部長・財団法人総合研究奨励会理事長

猪瀬　博

目　　次

1　材料設計——機能性セラミックスを例として　*1*

1.1　は じ め に　*1*

1.1.1　材料が時代を定義する　*1*

1.1.2　材料設計とは　*2*

1.1.3　材料設計の 3 段階　*3*

1.1.4　セラミックスにおける材料設計の段階　*3*

1.2　材料設計の基本的概念——不均質性と均質性　*4*

1.2.1　不均質性の導入による新機能の発現，多相系相互作用によるもの　*5*

1.2.2　不均質性の導入によって得られた新機能の信頼性向上　*9*

1.2.3　不均質性の導入による均質性の向上　*10*

1.3　新物質の探索手法　*10*

1.3.1　理論的推定(多くの場合結晶化学的な構造から類推する)　*12*

1.3.2　Serendipity の確保　*15*

1.3.3　多相系相互作用による新機能発現への期待　*19*

1.4　ま　と　め　*30*

文　　献　*30*

2　半導体材料，プロセス，デバイス，集積回路の設計　*33*

2.1　は じ め に　*33*

2.2　半導体技術における設計の重要性　*34*

2.3　半導体材料の設計　*36*

2.3.1 Ⅲ・Ⅴ族半導体のエネルギー帯構造の設計 39
2.3.2 シリコン・ウェーハの設計 44
2.4 半導体プロセスの設計 47
2.4.1 半導体プロセス設計用シミュレーション・プログラム 51
2.4.2 半導体プロセス装置の機能のシミュレーション 53
2.5 半導体デバイスの設計 56
2.5.1 DRAM用短チャネルMOS電界効果トランジスタの性能予測 57
2.5.2 モンテ・カルロ法による微小デバイスの特性予測 60
2.6 半導体集積回路の設計 63
2.6.1 設計の手順 63
2.6.2 設計規則の例 65
2.6.3 自動設計 67
2.7 む す び 72
参考文献 72
3 新しいシステム設計 73
3.1 はじめに 73
3.1.1 システムの設計 73
3.1.2 背景としての技術・産業のトレンド 74
3.2 システム構造の変化 78
3.2.1 集中から分散へ 78
3.2.2 コンピュータ・ネットワーク 81
3.2.3 ロボットにおける分散 84
3.2.4 交通システムにおける分散 86
3.2.5 ホロンとバイオシステム 88
3.2.6 システムの秩序化 91
3.2.7 システムのソフトウェア 93
3.2.8 CCV化 95
3.3 ヒューマン・インタフェースの設計 99
3.3.1 機器設計の考え方 99
3.3.2 エキスパート・システム 100
3.3.3 AIマシン 102
3.3.4 新しいマン・マシン・インタフェース技術 104

3.3.5 メンタル・モデル *107*
3.3.6 インテリジェント・ビルの考え方 *108*
3.4 おわりに *113*
参考文献 *114*
4 船の設計 *115*
4.1 はじめに *115*
4.2 船について *117*
4.2.1 船の種類 *118*
4.2.2 船の力学的特徴 *121*
4.2.3 輸送機械としての船 *126*
4.2.4 造船需要の市場規模 *127*
4.3 造船設計の現状 *128*
4.3.1 設計建造手順 *128*
4.3.2 設計上の問題点 *134*
4.4 個別生産品の設計 *138*
4.4.1 多様化の時代 *138*
4.4.2 設計のツール *140*
4.4.3 将来の造船設計システム *144*
4.5 おわりに *146*
参考文献 *147*
5 建築設計 *149*
5.1 はじめに *149*
5.1.1 合理性と非合理性の共存 *149*
5.1.2 建築評価の基準 *151*
5.2 経験としての建築設計 *153*
5.3 "芸術"としての建築設計，芸術家としての建築家 *154*
5.4 建築設計の専門化・組織化 *155*
5.5 思想家としての建築家の登場，イデオロギーとしての建築 *157*
5.6 建築設計の客観化，体系化 *158*
5.7 3つのモデル *162*

5.7.1 モデル I : Issue-oriented Model *164*
5.7.2 モデル II : Solution-oriented Model *166*
5.7.3 モデル III : Search-oriented Model *168*
5.8 む す び *170*
引用文献 *171*

1 材料設計──機能性セラミックスを例として

東京大学工学部工業化学科教授　柳田　博明

1.1 はじめに

1.1.1 材料が時代を定義する

今回のセミナーは「設計」というテーマで，最初が材料，そのつぎがデバイス，そしてシステム，あとの2者は船と建築を扱っている．この順序は非常によくできている．なぜ材料がいちばん先にくるかというと，要するにいい材料ができなければいいデバイスがつくれない．いいデバイスができなければいいシステムができないというふうに，とにかくいちばん最初にいい材料をつくらなければならない．それではそのいい材料をどうやってつくるか，その工学的手法が材料設計である．

新しい材料が開発されるとそれが新しい技術の開発になり，そして新しい文明につながっていく．案外気がつかれていないが，時代というのは，そこで使われている新しい技術を開いた材料によって定義されている．歴史でまず習うのは，縄文式土器，弥生式土器や，石器時代などである．最近では「○○器」といういい方はしないが，現在は鉄器時代といえるであろう．しかもその爛熟期である．

それから，材料というものが，その時代の経済や，ものの考え方を決めていくということがある．1つの例として，高度成長が何によって起こったかというと，その基本にはプラスチックスの開発がある．プラスチックスが大量生産されて，非常に安く供給されたということから生まれてきたと思われる．この

ため使い捨て文明が生まれたようにである．

それでは，このつぎにどういう時代が要求されるのか．こんどは材料で定義することが必ずしもできるかどうかわからないが，「○○ウェア」という言葉を使うとすれば，まず，最初のストーンウェアがあり，土器がアーサンウェア(earthenware)，鉄器がアイアンウェア，そしてプラスチックウェアときて，そのつぎにくるのは，多分ノレッジウェア(知識時代)だろうと思われる．われわれはそれに対応する材料を求めている．その材料をつくるときにどうしたらよいか．出てくるのをただ待っているのではなく積極的に新しい，いい材料を探すことを考えてみるというのが，材料設計ということである．

1.1.2 材料設計とは

材料設計は，「有用あるいは必要な材料を製造(合成)する，あるいは選択することによって世の中に供給するための科学的手法とか指導原理」と定義できる[1)]．ここで「有用，必要」ということが非常に重要で，両方書いておかなければならない．普通「材料設計」という言葉を聞くと，必要な材料をなんらかの科学的手法や指導原理によって選択して，世の中に供給することが材料設計だというふうに思われるかもしれない．しかし，それはニーズに対してただ応ずるということだけであって，実は，あまり積極的な意味はない．もちろん，もう少し性能のいいシステムとかデバイスをつくりたいというような場合は，明確にニーズがあらわれるので，それに必要な材料を現実の材料の中から適当な方法で選択して，供給するということができるが，もう１つ新しい文明まで切り開いていこうというようなレベルになると，いままでにない新しい材料(有用な材料)を製造するとか合成することによって，それを新しい技術体系の中に導入しようという立場も必要となる．そうすると，「有用(必要)な材料を製造(選択)することによって供給する」ことになる．最後の「供給する」というところがないと工学ではない．新しい材料や物質をつくってみて楽しんでいると理学部になってしまうが，工学部では供給までする．供給することを可能にするのが工学であるということである．

1.1.3 材料設計の3段階

「設計」という言葉は，材料から最後の大きいシステムまで広く使われているが，その材料のところでもいろいろ種類がある．材料設計は，材料の開発段階あるいは学問の深化の程度によって，大きくつぎの3段階に分類される．

(1) 有用になると期待できる新物質の探索あるいは選定

(2) 選定された物質を実用材料に仕上げる．

(3) 材料データバンクからの選択あるいは推定

この3つの段階はどれが大事でどれが大事でないということはない．本当はバランスよく3つ全部もっているのがいちばんよいが，学問のフェーズによって，またそれぞれ材料の開発がどこまで進んだかということによってウェートが違ってくるのである．したがって，その立場の差を無視して一括して材料設計を論ずることは，不毛に帰することが多い．ここで論じるのは筆者が専門としている機能性セラミックスを例としたものなので，ほかの材料の分野でも全部同様のウェートで考えられているというわけではない．材料の種類によって，どこに重点をおいて材料設計を考えているかということで，非常にフェーズが異なっている．

たとえば，先に鉄は爛熟期としたように，金属というのは非常に長い歴史をもっていて，データが相当揃っている．したがって，材料設計という観点になると，どちらかというと(3)の段階に重点がおかれているような感がある．

1.1.4 セラミックスにおける材料設計の段階

それに対して機能性セラミックスでは，候補になっている物質がまだ非常に少ない．したがって，まずこの(1)の段階の，新物質の探索，選定からはじめなければならない．また，同じセラミックスでも構造用のセラミックスということになると，こんどは(2)の段階が非常に重要になる．たとえば自動車のエンジン部材にセラミックスを使うということが多く研究されていて，多少実現の方向に向かってきている．その候補になる物質は結晶化学的な観点から理論的に推定されて，窒化珪素であるとか炭化珪素や，サイアロン(Sialon; Si_3N_4 - AlN - Al_2O_3 - SiO_2 系化合物)がよいと考えられる．その候補となった物質を

実用化するためにどういう手法をとったらいいかということが，いま一生懸命研究されている段階なので，構造用セラミックスのときには(2)の段階が問題になるわけである．それから，セラミックスの中でも，(3)の段階まで進んでいる例として，誘電体あるいは圧電体として優れた特性を示すペロブスカイト型において所望の特性をもつ化学組成，その焼成条件を与えるコンピュータ・プログラムが一部で実用化しているというものがある．もっともこれは，結晶構造が共通で組成変動が容易という有利な条件が揃っている稀なケースである．

先述したように，機能性セラミックスの場合にはより多くの候補物質を提示する必要がある．その中で真に実用的になる物質を選択し，あるいは実用化のために努力するということが重要になる．したがって，まず(1)の段階，それから(2)に進むことになる．機能性セラミックスの例として，われわれはセラミックスを使ったいろいろなセンサーを研究しているが，その中で湿度センサーというのがいま非常に問題になっている．たとえば部屋の中の湿度が何パーセントであるかをチェックし，それをデバイスとかシステムにフィードバックして，エアコンを制御しようという場合，実はその湿度センサーはまだ完璧なものができていないのである．その理由はいろいろあるが，そのうちの1つは，湿度センサーの候補になる物質がまだ十分提供されていないということである．もっといろいろな物質について確かめてみる必要がある．いま，すでに候補としていくつかの物質が提案されているが，それで十分だとはとてもいいきれない．したがって，もっと新しいものを提供する手段を考えてみようということになる．

1.2 材料設計の基本的概念——不均質性と均質性

材料設計の基本的概念には不均質性(heterogeneity)の導入ということと，均質性(homogeneity)の向上という一見矛盾した2つがある．この概念をつねに念頭に置いておくと材料開発にとって非常に有効に働く．何の考えもなくただいいものをつくっていこうということではなく，いまこれをねらっているからこちらを考えなければいけないということを整理していくとうまくいくようである．

一般に，不均質性の導入は新しい機能発現のために非常に有効な概念であり，均質性の向上は性能の向上，信頼性の確保のための基本概念である．どの次元での不均質性かということもあるが，とにかく不均質性というものが導入されると新しい機能があらわれる可能性が大きい．新しい材料が要求されている場合，よりよい材料と，より新しい機能をもつ材料とがあると思われるが，その場合より新しい機能をもたせるためであればまずこの不均質性の導入を考えてみる．そして新しい機能が得られたら，こんどはその機能を本当に信頼できるものにするために，ここで得られた不均質性を維持しながら，その上の次元で均質性を徹底的に追究するということを考える．性能の向上や，信頼性の確保のために，均質性を向上させるわけである．このように，不均質性の導入と均質性の向上は一見矛盾しているようであるが，両方とも必要である．その例をいくつか示す．

1.2.1　不均質性の導入による新機能の発現，多相系相互作用によるもの

不均質性というとき，いろいろな相が1つの材料の中に入っていて，その相互作用によって新しい機能が起こるというものと，いろいろな相が分散することによって新しい機能が生ずるというものとの2つの種類がある．多相系相互作用により得られる効果の代表的なものとしてつぎのような例がある．

(a)　半導性チタン酸バリウムにおける PTC 効果[2)]

チタン酸バリウムという物質はもともと誘電体材料でコンデンサに使われている材料であるが，ここにごく微量のランタンのオキサイド(酸化ランタン：La_2O_3)等の希土類酸化物を添加すると半導体化する．その半導体には非常に妙な特徴がある．たとえばほとんど純粋なチタン酸バリウムに 0.1 atm %程度のランタンのオキサイドを入れると半導体になるが，正確にはこれは 120 °C 以下では半導体となり，それ以上の温度になると急に高抵抗になる(図 1.1)．この特徴ある抵抗の温度変化は PTC 特性といわれている．半導体というのは普通温度が上がると抵抗が減るが，これは半導体なのに温度が上がると抵抗が増える．正の抵抗温度特性をもつということで Positive Temperature Coefficient を略して PTC 効果と呼ばれるわけである．

この材料をヒーターに使うと，温度が低いときには電流が多く流れて温度が

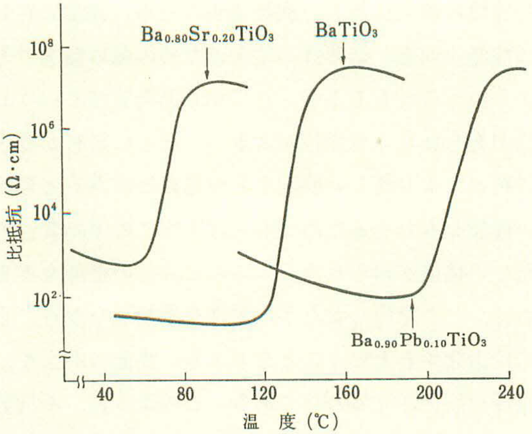


図 1.1　PTC サーミスタの温度 - 抵抗の例[2)]

上がる．ある温度になると急に抵抗が大きくなるので，急に電流が流れなくなり，温度の上昇が止まる．温度が下がってくるとまた電流が流れて暖まる．このようにして，いつもその温度に保たれることになる．この機能を利用すると，ヒーター兼，温度センサー兼，スイッチとして使うことができる．最近インテリジェント・マテイリアルなどということがよくいわれるが，これは1つの材料でそれができているわけである．身近なところで使われている例でいちばんわかりやすいのは最近よく宣伝されているセラミック・ヒーター，暖房器である．そのほか布団乾燥器，ヘアドライヤ等に使われている．この材料をヒーターとして使った場合，余分のエネルギーがいらないため非常に省エネルギーになり，また過熱のおそれもなく安全性も高くなる．

(b)　PTC 効果の出現機構

この特異な性質は多相系相互作用によるものといえる．セラミックスの特徴は粒子と粒子の間に粒界という境があることである．その粒界と粒子の性質は少し違う．それで「粒子 - 粒界 - 粒子」というふうにはさまれた構造がこの性質を出すのではないかと，解明されてきた．もしこれが単一系，ただ粒子の成分だけがある大きさになっているものだと，このような性質は出ない．「粒子 - 粒界 - 粒子 - 粒界 - 粒子」という不均質構造が原因になっている．この不均質構造の導入が新しい機能の出現に役立っているということである．

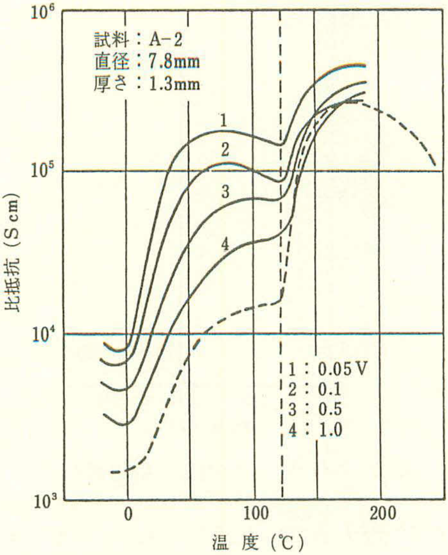


図 1.2 半導性 $BaTiO_3$ セラミックス - Bi_2O_3 膜接合による 2 段 PTC 効果[3)]

(c) 半導性チタン酸バリウムにおける 2 段 PTC 効果[3)]

この例は，同じようなチタン酸バリウムで，表面に絶縁膜である酸化ビスマスの膜をつけると，前例では PTC 効果が 1 段であったが，これは 2 段になるというものである(図 1.2)．この 2 段の効果はそれぞれ原因が違うということがあとでわかってきた．最初の室温付近で急に上がるほうは電極である金属と，酸化ビスマスの絶縁体と，半導体であるチタン酸バリウムという，MOS(金属 - 酸化物絶縁体 - 半導体)の構造による．あとのほうは SIS(半導体 - 絶縁体 - 半導体)とか SOS(半導体 - 酸化物絶縁体 - 半導体)をつくると，出てくることがわかってきた．したがってこの場合には不均質構造がちょっと違う．新しい意味での多相相互作用を使うと新しい機能が出てくるということである．

(d) 酸化亜鉛バリスタにおける非線形電圧 - 電流特性[4)]

これは酸化亜鉛に，ごくわずかの酸化ビスマスを加えて焼結体にしたものであるが，これをうまくつくると，ある電圧まではほとんど電流が流れずに，ある電圧から急に電流が流れるようになる(図 1.3)．これは粒子が半導体，粒界付近が絶縁体，粒子がまた半導体，という構造になっている．これも多相相互作用である．この材料は，ほとんどの電子回路に高い電圧が間違ってかからな

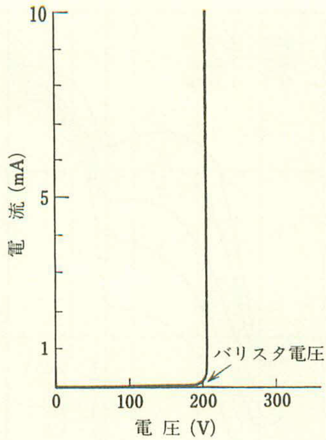


図 1.3　ZnO バリスタの電圧 - 電流特性の例[4)]

いようにと，保護素子に使われている．つまり，この素子を入れるとバリスタ電圧以上の電圧がかからない．この素子で全部電気を逃がしてくれるわけで，これが何千ボルト，何万ボルトとなったものが避雷器や，避雷針などである．これも不均質構造によるものである．

(e)　酸化銅 - 酸化亜鉛 p-n 開接合の化学センサー特性[5)]

もう 1 つはわれわれの研究室で見つけたものであるが，p 型半導体である酸

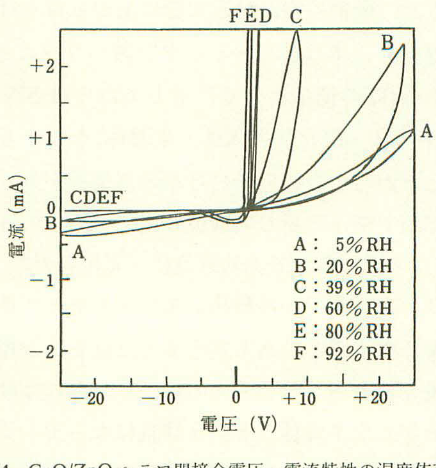


図 1.4　CuO/ZnO ヘテロ開接合電圧 - 電流特性の湿度依存性[5)]

化銅と，n 型半導体である酸化亜鉛を接触させると，湿度によって電圧電流特性が変化する (図 1.4)．これは，先述したように湿度センサーの材料としてまだ十分なものが提供されていないときに，こういう方式もあるということを提案する 1 つの根拠になっている．不均質構造によりこのような特性が出現する．

以上のように，不均質性を導入することによって新機能が発現するという例がいくつもある．したがって，設計の立場からすれば，あえて積極的に不均質性を導入するにはどうしたらいいかをまず考えてみよう，ということになるだろう．

1.2.2 不均質性の導入によって得られた新機能の信頼性向上

不均質性の導入によって新しい機能が得られたら，つぎは均質性の向上による材料の信頼性の向上を求めなければならない．それではどういう意味の均質性が必要とされるか．たとえば，先にとりあげた窒化珪素はエンジン材料の候補物質となっているのであるが，これが本当に使えるようになるためには粒子の大きさや，粒界の入り方，ポア (pore) の入り方が非常に均質でなければいけない．粒径が同じで，ポロシティがほとんどなく，あっても小さいポアがきれいに分散しているというような種類の均質性が必要で，そういうものができると信頼性が増すことになる．

それから，酸化亜鉛で，電流電圧特性が非常にきれいに立ち上がるという例を示したが，これはある次元で均質性がよく保たれたものである．どういう次元かというと，どの部分をとっても粒子の大きさが同じというものである．この材料では粒界を越すごとに 2 ないし 3 ボルト必要だということがだんだんわかってきている．たとえば 200 ボルトで立ち上がるときには，100 個くらいの粒界が電極から電極までの間に必要になる．ところがある断面では粒界が 50 個しかない，別の断面では 150 個あるということになると，全部 50 個のところに流れてしまうので，非常に無駄になる．要するに弱いところをつくらない，全部同じ強さにするということが必要になってくる．

このように不均質性の導入によって得られた新機能の信頼性向上のためには，こんどは均質性が必要である．新しい機能ができたとき，それを本当に使いこなすためには，つぎの次元での均質性が徹底的に必要とされるということであ

る．これにはいろいろな組合せがある．つぎにあげるのは非常にパラドキシカルな概念の例である．

1.2.3　不均質性の導入による均質性の向上

これは非常に不思議だと思われるだろうが，1つの例に窒化アルミニウム(AlN)という物質がある．これはセラミックスに関心をもっている会社で，窒化アルミニウムを研究していないところはもぐりといわれるくらい必ず話題になる物質である．この窒化アルミニウムは理論的な推定からいうと，結晶化学的には非常に熱伝導率のいい物質である．ところが現実に得られる熱伝導率は予想されるものよりも悪い．

熱伝導率が悪くなる原因の1つは不純物として酸素が結晶格子に入ってくるということである．それから，窒化アルミニウムがなかなか焼結しないということもある．酸素が入っているということは結晶格子の次元で不均質だということになる．そして焼結しないということは，その結晶構造の上の次元でも不均質だということになる．それをいかにしたら均質にできるかということで，現在は酸化イットリウム(Y_2O_3)や酸化カルシウム(CaO)を混ぜて焼成している[6),7)]．これらの酸化物を加えると，焼結が進む上に，窒化アルミニウムの中にある不純物酸素が酸化カルシウムや酸化イットリウム等のところにきれいにトラップされる．したがって酸化イットリウムや酸化カルシウムを入れることによって結晶の次元での均質性が上がり，しかも焼結が進むということでその上の次元での均質性も上がる．不均質性ということでは，この場合には窒化アルミニウムに Y_2O_3，CaO という新しいものを加えているから，新しい意味での不均質性を与えたわけであるが，実はいちばん大事なところの均質性が向上している．この成果により現在窒化アルミニウムを放熱性の基板に使おうという試みが可能になっている．これが不均質性の導入による均質性の向上ということである．

1.3　新物質の探索手法

機能性セラミックスにおける材料設計では，これまで述べたとおり新しい機

能をもつ有用な候補となる物質を探すところが重要である．新物質を探索するための手法は，大別して3つある．

第1は，理論的な根拠によって推定しようとするものである．第2のアプローチは serendipity の確保である．「serendipity[8]」というのは，たとえば「宝探しに出かけたとき，あまり近視眼的にならず少し余裕をもって大局的な判断をしている人はよい宝物，予期せぬ宝物を見つけることができる，そういう能力」のことをいうが，材料の研究では初期の目的を追究していくうちバイプロダクトにいいものが得られた例などを称している．ある目的のために研究・開発の努力をしているときに，その目的にはぴったり合わないけれども非常に面白い，有用と思われる材料あるいは機能を発見した，その発見したチャンスをみすみす逃さないようにするにはどうしたらいいか，ということが serendipity の確保である．第1のアプローチ，理論的根拠による推定というのが設計という概念に入るのはわかりやすいが，この serendipity の確保がなぜ設計に入るのかと疑問に思われるかも知れない．しかし，これが工学の工学たるところだといえるのではないだろうか．実は新しい物質を探索するとき，この serendipity によって見つかったというケースが非常に多いのである．だから実際はこれがいちばん大事ともいえる．これを逃がさないようにするためにどうするべきかをきちんとおさえておかないといけない．全部を理論で押すのではなく，現実をふまえて，serendipity を確保したところはどういうことで確保できたのか，それからそれをみすみす失ってしまった場合はなぜ失ってしまったのかということを考えておかなくてはならない．偶然発見されたと思われる新事実，新機能を見逃がさないための考え方を身につけることである．

さらにもう一歩進んだものが，第3のアプローチである．これは新現象，新機能が発現する確率の高いケースを設定するための概念構築ということである．前の，serendipity を確保するというときに，それがどういうときに発見動機となっているかを調べてみると，これには人的要素や学問的要素など，いろいろのものがある．その1つの学問的要素から見ると，前にも触れた多相系の相互作用ということがよく起こっている．それで見つかったというケースが多い．それでは，それを逆用して，新現象や新機能を発見する確率の高いケースを設定しよう，そのための概念構築をしよう，ということがこの第3のアプローチ

表 1.1 新規有用物質の探索手法と事例

I	理論的推定(多くの場合結晶化学的考察に基づく)
	高熱伝導性 AlN[6),7)]
	高イオン導電体(Nasicon)[9)]
	高輝度蛍光体 Y_2O_2S：Eu[10)]
	高感度ガスセンサー ZnO - Al_2O_3 - Li_2O[11)]
II	Serendipity の確保
	耐火物特性の向上→イオン導電性の発見　安定化ジルコニア[12)]
	チタニアコンデンサの温度特性改良→桁違いに大きい誘電率をもつ物質の発見　$BaTiO_3$[13)]
	焼結性の向上→温度急変半導性　半導性 $BaTiO_3$(PTC)[2)]
	2 段 PTC 効果の発現　1 段 PTC 機構解明研究中偶然に表面に Bi_2O_3 薄膜が形成された[3)]
	耐熱強度の向上→絶縁性放熱基板 SiC(BeO 添加)[14)]
III	多相系相乗作用への期待(混合則における非加成性)
	酸 - 塩基相互作用　TiO_2 - $MgCr_2O_4$ 系湿度センサー[15)]
	p-n ヘテロ接触　NiO - ZnO 系湿度センサー[16)]
	〃　CuO - ZnO 系湿度センサー[17)]
	〃　CuO - ZnO 系 CO ガスセンサー[18)]
	ホスト - ゲスト　ZnO - Li_2O - M_2O_3 湿度センサー[19)]
	酸化 - 還元　AlN - CaO，AlN - Y_2O_3 放熱性基板[6),7)]

であり，その確率の高いケースというのが多相系相互作用である．したがって，まず serendipity の確保ということを一生懸命やる．いわゆるケース・スタディを行う．するとつぎにこのような概念が出てくる．ここまでくると，また「設計」ということができるだろう．

以上のように，新物質の探索手法は I 理論的根拠による推定，II Serendipity の確保，III 新現象あるいは新機能を発見するための確率の高いケースを設定する基本概念の構築，ということである．具体的にどのようなケースがあるかをいくつか表 1.1 にまとめた．

1.3.1 理論的推定(多くの場合結晶化学的な構造から類推する)

(a) 高熱伝導性 AlN

先に例として挙げた高熱伝導性の窒化アルミニウムの場合は，結晶化学的考察からすると，熱伝導は非常にいいはずだということであった．このように，結晶化学的考察によりこれはいいはずだと信じてやるというのが理論的推定である．いいはずだと推定されるものについて，それをどうしたらよくできるかという方法として，窒化アルミニウムの場合には Y_2O_3 とか CaO を加えてい

る．これは実は多相系相互作用の期待をうまく利用したということである．

窒化アルミニウム(AlN)は結晶化学的に見ると熱伝導性が非常にいいと考えられる[1)]．それを Y_2O_3 や CaO を加えて相互作用を利用して本当によいものを得た．それでは，その作用がどうして起こるのかということを考えるとき，ここでまた結晶化学的な考察を行う．CaO という結晶は NaCl 型の構造で見ると，Ca のまわりに酸素が 6 個ある．ところでこれは化学の時間に習うことであるが，CaO というのは生石灰である．これを水の中につけると，猛烈な発熱反応を起こして消石灰になる．なぜかというと，Ca というのは酸素が 6 個の状態でいつも不満なのである．もっとよけいに酸素を欲しがっている．余分な酸素が欲しい，ということでまわりに水があるとそれをとる．それだけが原因ではないのだが，とにかく水をとるのである．同様に CaO を AlN に加えると，Ca のまわりにもっと酸素が欲しいということになるので，AlN から酸素がとれることになる．したがって，これはある意味では還元剤で，これ自身が酸化するということである．

(b)　高イオン導電体(Nasicon)

別の例として高イオン導電体 Nasicon という物質があるが，これも最近非常に騒がれている物質である．Nasicon の Na はナトリウム，s はスーパー，i はアイオニック，con はコンダクタの略で，ナトリウム超イオン導電体と訳す．実はこのスーパー・アイオニック・コンダクタというのはほかでいう超伝導物質とは全然違って，本当はあまり適当な表現ではない．せいぜいナトリウムのファースト(速く)・アイオニック・コンダクタぐらいが本当らしいが，Nasicon という名前がついている．

これを探すのにどうしたかというと，そもそも結晶の中にイオンが通るということはどういうことであるか，ということをまずよく考える．そうするとイオンが通るときに，なるべく邪魔をされないようなフレームワークをつくってやることが必要になる．このフレームワークというのは建築などと非常に関係があるといえる．あまりよいたとえでないかも知れないが，建築物の中で人間が通る動線を考える．そのときに人間がごつごつぶつからずに動くためには，どういう骨組みが必要かということを結晶化学で考えてみるわけである．その結果，こういうものだったらきっとイオンがよく通るだろうと推定したいくつ

かの構造があり，そのうちの1つが実際にナトリウムがよく通るものであったという．これは非常に見事な理論考察である．蛇足ながら，これを見つけた人は名前をグッドイナフといい，この名前が非常にいい．あと，いろいろ面白い発見をしているセラミストにハッスルマンとか，ワークマンという人がいて，本当によく働く人たちである．

(c)　高感度ガスセンサー $ZnO - Al_2O_3 - Li_2O$

これは，酸化亜鉛ガスセンサーの例である．酸化亜鉛の抵抗率や表面積などをコントロールするのに，添加剤をうまく選んだというケースで，これも結晶化学的な考察からできたものである．酸化亜鉛をガスセンサーとして使う場合は，表面積が多いことが必要とされるが，そのためには，アルミナ(酸化アルミニュウム)という物質を加えるのが効果的である．ところがそうするとこんどは抵抗率が小さくなりすぎて感度が確実に悪くなってしまう．そこでどうしたかというと，まず表面積の大きいものをつくるときにはアルミナを加える．そうしてから，それを確保しながら表面付近だけ酸化リチウムを加えて抵抗を上げる．このような2段階のドーピングの方法で高感度が達成されているのである．これも理論的な考察でできた例である．

(d)　高輝度蛍光体 $Y_2O_2S : Eu$

それからもう1つの例，$Y_2O_2S : Eu$ というのはカラーテレビの赤の蛍光体として代表的なものである．Eu(ユウロピウム)はきれいな赤を出すのに非常にいい元素である．これをどういうものに含ませるのがよいかということになると，イオン半径，化学的性質などを考えてイットリウムがいいということになる．Eu というのは非常に高価なものなので，なるべく少しの量でいい色を出そうとすると，まず固溶させる相手を選ばなくてはならない．そのつぎに電子線を照射して赤の色を出すことを考える．そのときに絶縁体であるとチャージアップ現象が起こる．一度チャージアップしてしまうと電子がつぎつぎとはじいてしまう．これを防ぐためにある程度の半導性を与える必要がある．ということで，その半導性のイットリウムの化合物が候補になる．いろいろな候補を試しているうちに Y_2O_2S がよいことがわかった．このときよい色を出すためには O と S の比がきちっと2対1になるような合成手法を考えないといけない．これもこの次元での均質性の確保である．

1.3.2 Serendipity の確保

(a) 安定化ジルコニア

ジルコニア(ZrO_2)という物質はふだんあまり馴染みがないように思われるが，最近使われている例ではセラミックスのハサミというものがある．最近の新聞記事に理髪店で使えるハサミが出て20何万円で売られるというのがあったが，これもジルコニアである．ZrO_2はもともとは耐熱性と耐薬品性と耐腐食性，それから硬さが十分あるので耐火物として使うというところからスタートしている．ところが温度による体積の変化が非常に妙な様相を示すので使いにくかった．その温度変化に対する体積の変化をなるべく減らそうと研究しているうちに，いいものができ，これが耐火物として，安定化ジルコニアというものになった．そのときに付随して得られたのが酸素イオン導電性である．この酸素イオン導電性を利用して自動車の排気ガスのセンサーをつくったり，熔鉱炉の中の還元状態がどうなっているとか，銅の中に酸素がどれだけ含まれているか，というようなことを調べたりすることができるようになった．

この例はアプリケーションのニーズがあったから開発されたというものではない．耐火物としていいものをつくろうと研究していたら，酸素イオン導電体ができてしまった．耐火物としてはもともと優れている．だから耐火性プラスアルファができて，高温で使える酸素イオン導電体という新しい用途が開けていくわけである．

これにはまだ続きがあって，安定化ジルコニアでは熱衝撃に弱く急に温度を変えたりすると，ショックがあって割れてしまう．その割れを少なくするために，どうしたらいいかというとき，最初の発想として，全部安定化したものでは行き過ぎである，しかし全然安定化しないものもだめである，だから毒をもって毒を制するという意味で，足して2で割ってみようということを考えた人がいた．そうして一部分だけ安定化したものをつくってみたら非常にうまくいった．これは後にそんな単純なメカニズムではなくてもっと複雑なものだとわかってきたが，最初の発想が非常にいいといえる．このように，耐火特性の向上を目的として研究していたら，イオン導電性や耐熱衝撃性の高いものまでもが得られたのである．

(b)　チタン酸バリウムの発見

これは前にも述べたチタン酸バリウムの例である．もともとは TiO_2 という物質が誘電体として非常によいのだが，温度が変化すると誘電率も変わってしまって非常に使いにくい．そこで温度特性を改良する目的で研究をしていた．そのときに BaO を加えると非常に誘電率が大きくなり，TiO_2 では数十くらいのものが数千まで上がってしまった．これは最初の目的とは全然違う．しかも温度係数はかえって大きくなってしまった．初期の目的に比べると悪い方向の結果が出たわけであるが，新しい物質を発見したということになる．こうしてできたチタン酸バリウムは，いまや非常に重要な物質であり，これがなかったら世の中のコンデンサはほとんど存在しないほどである．誘電率は数十から数千まで上がったわけであるから，2 桁近く向上している．最近でこそ軽薄短小がいわれているが，その軽薄短小を最初に可能にした物質がこのチタン酸バリウムではなかったかと思われる．これは以上のように偶然見つけられたものなのである．

ところで，これは日本とアメリカとソ連でほぼ同時に，ほとんど完全に独立に見つけている．どうして独立にできたかというと，互いの国が戦争をしていた第二次大戦中だったため情報の交換がなかったのである．学生にもよく，面白いものを見つけたときには，君と同じ発見をしたのは世界中に 2 人いるから，1 日でも早く発表するように論文を書きなさいというのであるが，現実にはそう簡単に書いてくれないようである．

(c)　半導性チタン酸バリウム

チタン酸バリウムの特性を生かすためには，きちっと焼結させなければならないが，これは意外に難しい．そこで焼結性の向上のための研究が行われたが，その過程で温度急変半導性 (PTC 特性；前出) が見つかった．これは絶縁体でなければいけないものが半導体になったので，初期の目的からいうと完全な失敗ということになる．ところが先述したように，後になってこの特性を生かしたいろいろな用途が出てきて，あちこち使われている．このチタン酸バリウムの半導性を発見した人は，日本でもアメリカでもいろいろなところに多くいるが，ほとんどの人が，これは失敗だと思ってデータを捨ててしまっている．ところが，フィリップス社だけが成功だと思って，ちゃんと世の中に発表してい

た．いまになってみると，あのとき発表しておけばよかったと思う人がずいぶん多いことであろう．これなどは，serendipity の確保の重要さを示すよい例である．

(d)　2 段 PTC 効果の発見

これも前に少し触れたが，チタン酸バリウムの 2 段 PTC 効果の発見も偶然によるものである．十数年前，筆者の研究室は，ガラス，陶磁器，セメント，耐火物の研究室であり，筆者はその研究をやるべく運命づけられていた助教授であった．しかし，どうもこれだけでは面白くないと思い，教授に少し新しいことをやらせてくださいといってちょっと造反した．どうぞやりなさい，その代りいっさいめんどうは見ないといわれ，首にさえならなければ結構ですからやらせてくださいということで，そのときいろいろ選んだテーマの 1 つが，この半導性チタン酸バリウムがなぜ半導体になるか，なぜ急に抵抗が上がるかを調べてみようということであった．そう考えてやっていたところ，あるとき偶然表面に酸化ビスマスが形成されるような条件が生じた．どういうことかというと，前の日に学生が炉を使っていて，つぎの日にその炉でこれを焼いたのである．これは最近はやりの CVD といえる．前日に CVD で炉壁についたものが，つぎの日に CVD で落ちてきた．こうして，チタン酸バリウムの表面に酸化ビスマス薄膜が形成されてしまい，それで見つけたのが 2 段 PTC なのである．

この 2 段 PTC の発見は筆者にとってたいへん得な役割を果している．日本では東京大学というと有名であるが，外国では知らない人が結構多い．特にセラミックスの分野では東京工業大学のほうがセラミックスの研究室が多く，そちらのほうが有名である．外国で人を訪ねていって名刺を出すと，トウキョウ・インスティテュート・オブ・テクノロジーに，あらためてエンジニアリングがあって，ユニバーシティ・トウキョウというのがあると思うのか，付属の付属になってしまって，名刺では全然会ってくれない．ところが 2 段 PTC を見つけた者だということでいくと，途端に態度が変わる．この技術については特許をいくつも出願したが，とうとう一銭にもならなかった．しかし名刺代りとしては非常に役に立ったのである．

(e)　絶縁性放熱基板 SiC の開発と AlN

SiC はエンジニアリング・セラミックスとして有望ということが推定されて，耐熱強度の向上のためもっと焼結程度を上げたいとか，もっと均質なものにしたい，ということで努力がなされてきた．その研究の過程でごくわずかなベリリアを加えると，もともと半導体である SiC が絶縁体になってしまった．しかも熱伝導率が，本来 SiC がもつ非常に高純度の物の値にまで上がってしまう．これは絶縁性があって，しかも熱伝導率がいいなら，IC 基板にいいのではないかということで，放熱性の絶縁基板としても使える可能性が出てきたということである．この応用にはまだいろいろ難点があるが，発見としては非常に大事である．

AlN に高熱伝導性が得られたのも実はこれが動機になっている．α - SiC と似た結晶構造をもっている AlN に何か加えたら熱伝導率がよいものができるのではないかと調べてみたら，これが Y_2O_3 であった．先に I の理論的推定のところに AlN をあげたが，その推定を可能にする根拠になったのが SiC に BeO を加えた発見であった．それがどういうメカニズムで残っているかというと，AlN に Y_2O_3 という物質を加えて均質構造を導入している．これは，先にも述べたが多相系相互作用ということになる．3 つのアプローチは非常によくからんでいるのである．

(f)　Serendipity の確保

Serendipity の例はほかにも多いが，いままであげた例からだけでも，これがいまのエンジニアリングにどんなに役立っているかがよくわかると思う．特にジルコニア，チタン酸バリウム (PTC) は非常に大きな役割を果している．ここではとりあげなかったが，「不均質性の導入による新機能の発現」のところで例にあげた酸化亜鉛バリスタというのも偶然見つけられたものである．このように現在これはすごいという材料のほとんどは偶然見つかっている．逆にいうと，設計というテーマでこのことを明かすのは残念であるが，工学的な意味からいうと非常に重要性がある．だから，大事なのはこれをいかに逃がさないように日頃からトレーニングを積んでおくかということである．どういうときにこれらの発見がなされたかということから考えてみると，まずチャンスに恵まれるためによく働かないといけない．しかしただ働いているだけでは駄目で，

妙なことを発見したときにそれを面白いと思う余力がないといけない．だからよく遊んでないといけない．それから面白いと思ったときに，これが価値あるものかどうかわからないといけないので，よく学んでいないといけない．「よく働き，よく遊び，よく学ぶ」この3拍子揃っている人でないと見つからない．たいていの場合，いわれたこと以外のことをやると上司が怒るとか，いわれたこと以外自分ではやらない，とかいうがそれでは絶対新しいことは見つからない．いわれたこと以上にやって，しかも見つけたことを上司に持っていく勇気があり，上司にもそれを認める能力と度量があって，というふうに社会的環境のほうも大事である．だいたい新発見というものが真発見として世の中に出る確率は5%である，というデータもある．あとの95%は人間関係でつぶれてしまうそうである．したがって大事なのは材料の立場からいくと相互作用であるが，人的立場からいくと，人間関係とか組織の考え方ということになる．

1.3.3 多相系相互作用による新機能発現への期待

(a) 偶然性の意識的設計

新規機能材料の探索の手法は，大別して理論的なアプローチと，偶然性の確保，そして偶然性の意識的設計である．偶然性の確保は先に述べたように，serendipityの得られたケースをよく解析することからはじまる．多くの場合，研究開発に携わった人の人間性，発想法，価値判断などの要素が浮かび上がってくるが，材料科学的に見るとそこには多相系相互作用による新規機能の発現という機構が働いていることがわかる．偶然性の意識的設計とは，多相系相互作用の生起しやすい状況を準備することにより新規機能の発現確率を高めることである．機能性セラミックスの場合，こうして発見された新規機能は数多い[20)]．

(b) 対立するもの同士の組合せ

多相系相互作用が起こりやすい状況の準備とは，まず対立するもの同士を組み合わせようということである．たとえば漁場の場合，寒流と暖流がぶつかり合うところでよく魚がとれる．それから会話も男同士の会話よりも，多分男女の会話のほうが面白い．何か起こるかもしれない．このような対立するもの同士の組合せとしては酸 - 塩基とか，p型半導性 - n型半導性とか，還元剤 - 酸

表 1.2 多相系相互作用による新規現象(機能性セラミックスにおける事例)[20]

相互作用相	動作機構仮説	新規現象	応用例	発見者
$MgCr_2O_4/TiO_2$	酸-塩基	湿度による抵抗変化	湿度センサー	松下電器産業[15]
MgO/ZrO_2				
CuO/ZnO (NiO/ZnO)	p-n 接触	湿度あるいは溶媒による V-I 特性変化	湿度センサー	柳田研究室[5,16,17,18]
			溶媒検知	
		CO ガスによる抵抗変化	CO ガスセンサー	
SiC/BeO	p-n 接合	熱伝導性電気絶縁性	IC 基板	日立製作所[14]
AlN/Y_2O_3	酸化-還元			東　芝[6]
AlN/CaO				徳山曹達[7]
ZnO/Bi_2O_3		非オーム性抵抗体	バリスタ	松下電器産業[4]
ZnO/Pr_6O_{11}				富士電機製造[21]

化剤などが考えられるだろう．とにかく対立するもの同士が面白い．逆にいうと対立しなければ面白くない．互いが個性を主張して対立する，しかしまた相手を潰してしまってはいけない．共存し，しかも相互作用で何かできる状況をつくってやらないといけないということである．その例をいくつか示したい．

機能性セラミックスにおける事例を表 1.2 にまとめたが，これらの新規現象はほとんど界面を介しての相互作用によっている．以下その観点で説明を加えるが，相互作用の機構の詳細については筆者の仮説であるものがほとんどであることをあらかじめお断りしておく．ここでは動作機構を詳細に論ずることに主眼があるのではなくて，新材料を探索するための作業仮説を提示することにあるのでご容赦いただきたい．

(c)　酸性と塩基性

最初の例として酸 - 塩基をあげる．表 1.2 に示したものは酸性耐火物と塩基性耐火物の組合せである．MgO (あるいは $MgCr_2O_4$) というのは塩基性耐火物の代表例である．一方ジルコニア (あるいはチタニア (TiO_2)) は酸性耐火物の代表例で，いずれも耐火物である．これらを共存させると湿度の変化に対して，抵抗の変化率が非常に大きいものが得られる．それぞれでも多少は変化するが，共存させることにより，非常に大きく変化する．

この現象を湿度センサーに使っている．どこに使われているかというと，松下電器の電子レンジに組み込まれている．これは非常にいいアイディアである．

なぜかというと，MgO とジルコニアは不均質に分散していて，それで感度が出る．これを電子レンジに使うと，油などがついて汚れてしまう．そこでもう一度感度をよくするために，汚れを焼いて飛ばしてしまう方法が採られる．これは，材料が耐火物であるということで可能となっている．このようにいろいろな意味で面白い酸と塩基の組合せの例である．

(d)　酸化と還元

何度も例にあげてきたが，窒化アルミニウムにイットリア(Y_2O_3)とかカルシア(CaO)を加えたものでは，窒化アルミニウムの中の酸素がとれているような格好になっているが，これは広い意味での酸化 - 還元である．

それから酸化亜鉛に酸化ビスマスを入れたもの(松下電器)，あるいは酸化亜鉛にプラセオデュウムのオキサイド(Pr_6O_{11})を入れたもの(富士電機)がバリスタ特性といわれている非線形の抵抗性を示す(図 1.3 参照)．この場合もケミカルな意味で解釈すると，酸化ビスマスとか酸化プラセオデュウムというのは，原子価の非常に変わりやすい物質である．だから 1 つの組織にした場合，温度が高くなったり低くなったりするときに，これらの物質を介して酸素を出したり入れたりすることができる．いわば buffer(緩衝剤)である．図 1.3 のように電圧 - 電流特性が非常にシャープに上がるというような構造は，粒界付近が酸化層に，粒子の中は還元層になっているような状態である．その粒界付近を酸化層にするときに，その酸素の供給源になっているのがこれらの物質である，というふうにわれわれは解釈している．したがって，これも一種の酸化 - 還元である．

(e)　p-n 接合

これも前に例にあげたが，SiC に BeO を加えたもので熱伝導性が非常によくなり，電気絶縁性を示す(日立)．この辺の説はまだ確立されていないが，どういうものかを推定してみると，SiC という粒子があって，三角点(トライアングル・ポイント)に BeO が介在している(図 1.5)．この境付近に BeO があるのかないのかということはいまだに議論になっているが，ただわかっているのは SiC 自身は半導性のままだということである．しかし全体としては絶縁性である．これはどうしてかというと，SiC は n 型の半導体であるが，こんど高抵抗になったところを無理やり全体を測ってみると，これは p 型の半導体

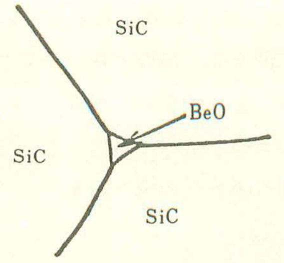


図 1.5　高放熱性 SiC 基板(BeO 添加)の微細構造の概念図

なのである．しかも粒界をはさんで SiC から SiC を測ると高抵抗になっている．これは SiC が n 型で，粒界付近が p 型あるいは絶縁障壁とわかる．全体は p と考えたほうがいい．そうすると n-p-n で，しかもこれは接触している面が，closed であるから，p-n 接合であるといえる．p-n 接合はふつう整流特性というものを示す．n 型半導体というのは電子が動きやすい半導体であり，p 型半導体というのはそのホールが動きやすい半導体である．それだけではあまり面白くないが，p と n をつけると 1 方向にしか電流を流さないという機能が出てくる．これが整流特性である．したがって，これは不均質性の導入によって整流性という機能を出したことになる．その拡張解釈をここでやったわけである．

(f)　セラミックスにおける界面

以上のような点から，どういうところが相互作用の非常に出やすいところかということを考えてみると，2 次元構造というものを意識的につくってやることによって，その相互作用を得られる可能性が非常に大きくなるということである．界面，表面などは 2 次元構造であるが，ここでは 2 次元構造についてもう少し厳密な定義と分類をしておく[22]．

分類の基準は，(1) 界面(interface)であるか表面(surface)であるか，(2) 閉構造(closed structure)であるか開構造(open structure)であるか，(3) 界面の場合，同種物質間(homo interface)であるか異種物質間(hetero interface)であるか，(4) 現象の生起する機構が 2 次元構造に垂直(across)であるか沿って(along)であるか，である．これらの基準に基づいて界面・表面を分類した結果をまとめると表 1.3 のようになる．先ほどの p-n 接合はこの 2 次元構造で p 型の半導

表 1.3 セラミックスにおける 2 次元構造の種類と記号[22]

		現象の生起する方向		開構造または閉構造の区別
		面に直角 across	面に沿って along	
界面 interface	同種物質間 grain boundary	GB⊥	GB //	閉構造 closed structure
	異物質間 heterojunction	HJ⊥	HJ //	
	同種物質間 neck	NK⊥	NK //	開構造 open structure
	異種物質間 heterocontact	HC⊥	HC //	
表面 surface		SF⊥	SF //	

体と n 型の半導体を接合させたという例である．接合自身がきちっと閉じているので，closed structure である．界面で，closed structure で，現象は界面を通して垂直に起こっている．

電子材料などのときには，たいてい「界面で，閉構造で，現象が垂直に起こる」場合しか議論されないが，2 次元構造の中にはそれ以外の組合せのものもずいぶんある．

(g) 同種物質間閉界面相互作用があり現象が界面に垂直に起こるもの（図 1.6）

チタン酸バリウムの PTC 効果で 120 ℃ で急に抵抗が増えるとか，SiC に BeO を加えたときに絶縁体になって高熱伝導性になる，という現象がこれにあたる．先述のように BeO 添加 SiC では SiC 粒子には半導性は残っているが，粒界をはさんでは（GB⊥）絶縁性になっている．それから酸化亜鉛バリスタでも現象は垂直に起こる．これは先ほどの酸化亜鉛と酸化ビスマス，あるいは酸

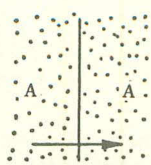


図 1.6 同種物質間閉界面で現象が面に直角の方向に起こるもの（GB⊥）[22]

化プラセオデュウムを介したときに，酸素が出入りするといったことを意味する．酸素の出入りする道はこの界面である．

(h)　同種物質間開界面相互作用で現象が面に垂直に起こるもの（図 1.7）

半導性の酸化亜鉛を用いる可燃性ガスセンサーでは，粒子と粒子の接触部（これをネックと称する）の抵抗が雰囲気によって変化することによってセンサー特性を示すと考えられている[23]．粒子は n 型半導性であり，空気中など酸素ガスの豊富な環境ではネック部は酸素吸着により高抵抗となっている．このとき一種の n-p-n あるいは n-i-n 接合が形成されており高抵抗を示すが，可燃性ガスがネック部の酸素を脱着させると p あるいは i が消滅して低抵抗となる．センサーとしての焼結体の多孔率と導電率の最適化を Al_2O_3，Li_2O の 2 段添加法で図ることもこの機構を考慮に入れてのものである．

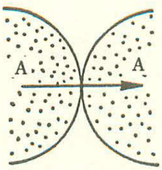


図 1.7　同種物質間開界面で現象が面に垂直に起こるもの（NK⊥）[22]

(i)　異種物質間開界面を介しての相互作用による新規現象

このケースは，いろいろと興味深い現象が得られているので少し詳しく紹介したい．この場合，異種物質間であり，その界面が開いているということである．先に CuO と ZnO の接触が非常に面白い電流 - 電圧特性を示して，しか

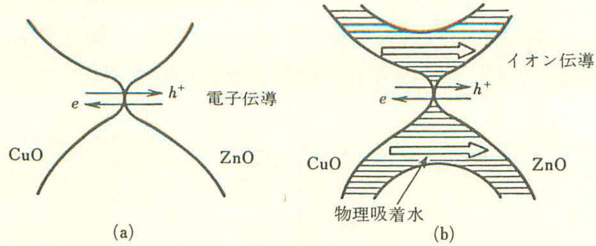


図 1.8　CuO/ZnO ヘテロコンタクトの感湿特性発現のメカニズム[5]
物理吸着水が存在すると p 型表面で水の酸化が，n 型表面ではプロトンの還元が起こり，電子伝導がイオン伝導に変換されて電流が増大する．

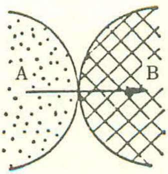


図 1.9 異種物質間開界面で現象が面に垂直に起こるもの(HC⊥)

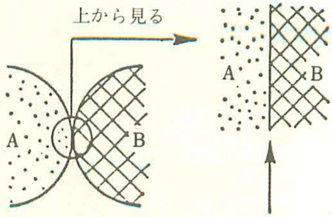


図 1.10 異種物質間開界面で現象が面に沿って起こるもの(HC//)[22]

もそれが湿度によって変わるということを述べた．この構造は，CuO と ZnO は確かにくっついてはいるが，このくっついている点のところに，水蒸気が吸着して(図 1.8)，吸着した物質がそれと相互作用をする．吸着する場所ができるものである．これは開かれた界面である．それからこれは p 型と n 型という 2 種類の物質の相互作用だけではなくて，もう 1 成分ここに吸着物質というものが相互作用をしている．したがってこの場合は 2 相ではなくて多相ということになる．電流 - 電圧特性は→の方向で流れるようにでき上がっているから，これは垂直に起こっていることになる．このように，これは異種物質間の界面で，開いた界面，しかも現象としては接合を含んでいることになる(図 1.9)．図 1.4 のようにこの電流 - 電圧特性は湿度を変えるにしたがってどんどん変わっていく．このことから，これはまず湿度センサーとして使える可能性がある．

TiO_2 - $MgCr_2O_4$ 系の湿度センサーも異種物質間開界面現象を利用したものである(図 1.10)．吸着された水分子の解離が，TiO_2/$MgCr_2O_4$ 界面で促進され，この面に沿っての導電率が大きくなると考えられている．

(j)　CuO/ZnO による溶媒検出の可能性

つぎに示すのは，前出の CuO/ZnO を溶媒に浸した場合である．図 1.11 で，A は 100％のアルコールである．だんだん水を増やしていくと E になる．また，溶媒の種類を変えると，それぞれ異なる電流 - 電圧特性を示す(図 1.12)．これらから，電流 - 電圧特性のパターンが，分子構造が違うとどうも変わっているらしい，ということが見当がついてきた．普通のセンサーでは，条件を変えたときに抵抗がどれだけ変わるか，ということしか調べない．あるいは流れる電流はどれだけであるかといった，1 点の情報しか調べない．変化量 1 つに

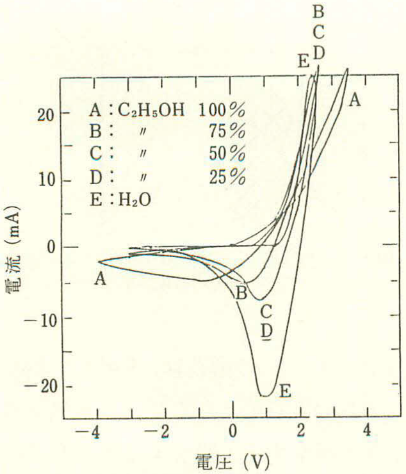


図 1.11　CuO/ZnO ヘテロ接合における電流 - 電圧特性の溶媒による変化[24)]

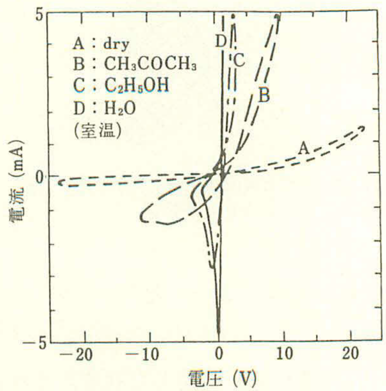


図 1.12　CuO/ZnO ヘテロ接合における電流 - 電圧特性の溶媒による変化[25)]

対して，それを観測するのは 1 個という調べ方である．ところが，この場合は，電流 - 電圧特性を見ているためパターン認識が可能である．2 次元のパターンで見てみると，どうも 2 次元のパターン自身が分子の構造と関係しているらしい．したがってこの 2 次元情報の解析により溶媒の種類を識別することができる[26)]．アルコールと水というのは共通性があるので，この場合は識別するだけではなくて，量まで定量できる可能性がある．これは CuO と ZnO がただばらばらなだけでは，こういう結果は得られない．これは開接合であるからこそこのように電流 - 電圧特性を調べることができるのである．分子構造を調べるところまでいかないが，パターンからどの溶媒のときにどういう格好になるかということを調べておきさえすれば，これが溶媒を検出する 1 つの手段になりうる，ということを示しているのではないかと思われる．

(k)　CuO/ZnO の感湿機構

この素子は最近非常に発展性を見せてきているが，それではなぜ湿度に対して感ずるかについてだんだんわかってきたのでその仮説だけでも紹介したい．

ここでは非常に面白いことが起こっている．CuO というのは p 型半導体である．その CuO の p 型から供給されるキャリアはホールである．ホールが吸着している水に供給される．そうすると水の中にプロトンが発生する．そのプ

ロトンが ZnO という n 型の半導体の表面にくると，そこから供給される電子と結合して電荷を失って，水素ガスを発生する．それと同じように CuO の表面では酸素が発生する．したがって，これは水を電気分解している．だからこれは整流性である．いままでの半導体の概念からするとわかりにくいが，整流性は出るけれどもその整流性は電子的な意味での整流性ではなく，イオン電流が整流性をもたらす．しかもそれを得るためには p 型と n 型でなければ駄目である(図 1.8 参照)．

そのままにしておくと，たとえば CuO の表面に水がつく，あるいは ZnO の表面に水がつくことで抵抗値が変わって，それ自身が湿度センサーにもなりうる．このような場合，吸着した水がべたっとついているので，つぎに測るとき，その水を全部とばしてしまうこと(クリーニングと称している)がときどき必要になってくる．ところがこの場合には，クリーニングするために必要な電流自身が湿度センサーとして働いていることになる，つまり吸着水分子がつねに電気分解を受けているため，わざわざ水分子の脱着加熱処理によるクリーニングを行う必要がないのである．自己修復性をもった湿度センサーということになる．したがって，いままでのセンサーは湿度が変わったときにいかに抵抗変化だけを測るか，あるいはキャパシタンスの変化だけを測るかという方法であったが，この場合はメカニズム的にいうと，ついている水を飛ばすための電流を計ることがセンサーになる，という新しい原理である．

(1)　相互作用による一酸化炭素センサーの研究

人間的な相互作用も重要である．CuO と ZnO の組合せで湿度センサーをやっているのを，当研究室の卒業生が見にきた．その卒業生は触媒を専門にしている人間であるが，この組合せは非常に面白い，これは一酸化炭素を H_2 と CO_2 に変成する触媒として使っているから一酸化炭素に感ずるはずだ，ということをいう．それではということで試みたのであるが，最初の 1 年間は，この組合せは全く一酸化炭素に感じない．感じないものの典型例になるくらい，感じないセンサーであった．その理由はあとでわかったのであるが，普通酸化亜鉛とか酸化錫等ガスセンサー素子の材料は，大体 350 °C から 450 °C くらいの温度で動作する．したがってその温度で調べるものだという先入観があったのである．ところがその温度では酸化反応が完全に進みすぎて全く感じない温

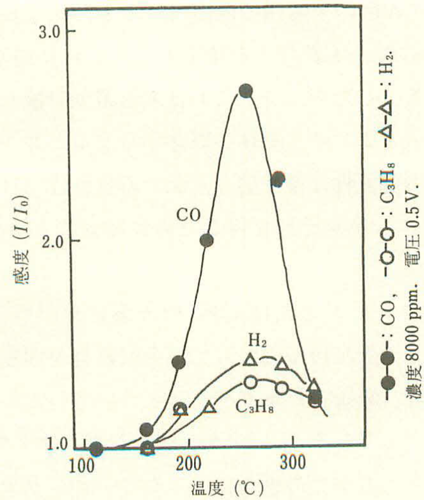


図 1.13 CuO/ZnO ヘテロ接合の各種ガスに対する感度の温度依存性[18)]

度となっていたのである．

ところで一方，当研究室の他のグループでは，酸化亜鉛や酸化錫は部分酸化反応を検出しているセンサーだということがわかった．そのことから考えてこれは完全に酸化してはいけない，もう少し温度を下げたら動作するのではないか，という発想になった．そこで調べてみたのがこれ(図 1.13)である．

これは縦軸に感度をとっている．こうして二百数十度のところで CO によく感ずることがわかった．三百数十度以上で感度がないといって，それで諦めてしまったら，この結果は得られなかった．研究室の中のほかのグループ，あるいはいろいろなところと議論していたところ，ちょっと温度を下げてみようかという発想が浮かんで，それが生まれてきたということである．

つぎに非常に面白いことが見つかったのは，普通酸化亜鉛や酸化錫をセンサーとするときには，CO と水素の区別がつかないのだが，この素子はどうも区別しているらしいということである．それで，これは一酸化炭素のセンサーになるのではないかということで，いま一生懸命研究を続けている．もしこの一酸化炭素センサーができたら，それこそこれを建築に使っていただきたいし，船にも積んでいただきたいということになる．しかし現在は，新しい現象を見

つけたけれども，まだ信頼性が足りない，信頼性向上のため努力している段階である．それでも一応現象が見つかったわけである．

(m)　インテリジェント・センサー

このヘテロ接合によるセンサーの場合，かける電圧を変えることができるが，図 1.13 に示したのは CO に対する感度のいいところで測ったものである．かける電圧を変えてみるとその感度は一様に変わるのではなくて，あるものについては急に感度が悪くなったり，あるものはあまり変わらなかったりで，これも先述のパターン認識である．したがって，電圧を振りながら，それをうまく解析してみると，1 つの素子でいくつものセンサーをもち，それをコンピュータ処理するというようなことができるので，可能性としては非常に大きなものになるのではないかと思われる．印加したバイアス電圧によりガス種の選択性が制御できるわけであるから自分自身がチューニングできるセンサーということで，これを命名してチューナブル・センサーという．原理は自己修復性であって，これ自身がチューナブルである．インテリジェント・センサーがそれ自身でできていることになる．

その機構を調べてみると，まず CuO と ZnO の開かれた接合の界面に CO がきたときにはきれいに吸着状態が検出できる．それに対してプロパンや水素やエアのときには，あまりそれがない．したがって CuO と ZnO の界面に CO が選択的に吸着されていることになる．それでは選択的に吸着する物質を変えてみれば，こんどはほかの種類のガスに対して敏感なものができるのではないか．最近は NiO と ZnO という組合せを調べているが，これもまた非常に面白い．この場合は CO もプロパンも水素も全部感じてしまう．したがって可燃性のガスがあるかないかを知りたいときには NiO と ZnO のセンサーで調べ，その中で CO があるかどうかなどを調べようと思ったら先ほどの CuO と ZnO がいい．このように組合せを変えることができ，しかもそのときには電圧も変えられる．原理が自己修復性であるからいろいろと面白いことがまだあるのではないかと考えられている．

1.4 ま と め

新しい材料が求められているとき，その材料を探索・開発するための科学的手法が材料設計と呼ばれている．機能性セラミックスの場合には材料設計の第1段階である有用材料になる可能性のある候補物質をつくることが重要である．その場合，新規現象や新規機能探索のための有力な手法は，serendipityの確保のもう1つ上の段階まで進んで，新規現象の発現する確率の高い系や場を設計することである．新規現象発現の可能性は多相系の相互作用の利用に多く期待される．したがって多相系の相互作用が起こる場として，こんどは2次元構造における界面というものの設計が要求される．閉界面から開界面，異種，同種物質間などいろいろな界面があり，現象の起こる方向も垂直のもの，平行のものがある．それらをうまく使えば，新しい現象が起こりうる可能性も非常に大きくなると思われる．

要するに新規に有用な材料を創製するための手段として，界面設計がきわめて重要な意味をもつということが最終的な結論としていえる．この方法でこれからの新しい材料がどんどん生まれてくるのではないか．そしてさらにそれを信頼できる材料にするために，こんどは均質性という概念を導入してより信頼性の高い材料へと仕上げていく．工学的には「設計」という言葉はいろいろな意味合いで使われると思うが，そのいちばんもとになる材料における設計とはどういうものかということを機能性セラミックスを例として述べてみた．

文　献

1） 柳田博明：機能性セラミックスにおける材料設計，セラミックス，**19**(5)，417-423，1984.

2） P. W. Haayman *et al.* : British Patent 714, 965, 1954 ; German Patent 929, 350, 1954.

3） M. Kuwabara and H. Yanagida : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **11**, 1130-1138, 1972.

4） 増山　勇ほか：*National Report*, **15**(2), 216-228, 1969.

5） 中村吉伸・池尻昌久・宮山　勝・河本邦仁・柳田博明：日本化学会誌，6号，1154-1159，1985.

6） 柘植章彦：高熱伝導性AlNセラミックス，セラミックデータブック'85，396-400，

工業製品技術協会，1985.
7) 倉元信行・谷口人文：透光性 AlN セラミックス，同上，401-405.
8) 柳田博明：日工マテリアル，**1**[4]，28-37，1983.
9) J. B. Goodenough, H. Y. P. Hong and J. A. Kofals : *Mat. Res. Bull.*, **11**, 203, 1976.
10) 加納剛・柳田博明編：レア・アース——その物性と応用，173-192，技報堂出版，1980.
11) Y. Takuma, M. Miyayama, H. Yanagida : *Chem. Letters,* 345-348, 1982.
12) 柳田博明・山吉恵子：ファインセラミックスとしてのジルコニアの研究開発史，化学工業，**35**(9)，797-802，1984.
13) 1942-45 年頃日本(小川・和久ら)，米，ソでほぼ同時しかも独立に見いだされた．
坂野久夫著：ニューセラミックス，p. 63，パワー社，1984.
14) 浦　満：高熱伝導・高絶縁性 SiC セラミックスの開発の経緯，セラミックス **20**(6)，495，1983.
15) 新田恒治・寺田二郎：セラミックス感湿センサ"ヒュミセラム"，*National Technical Report* **24**(3)，422，1978.
16) K. Kawakami, H. Yanagida : *Yogyo-Kyokai-shi,* **87**, 112, 1979.
17) Y. Toyoshima, M. Miyayama, H. Yanagida and K. Koumoto : *Jpn. J. Appl. Phys.,* **22**, 1933, 1983.
18) Y. Nakamura, A. Ando, T. Tsurutani, O. Okada, M. Miyayama, K. Koumoto and H. Yanagida : *Chem. Letters,* 413, 1986.
19) M. Miyayama, Y. Takuma and H. Yanagida : *Chem. Letters,* 1735, 1982.
20) 柳田博明・山吉恵子：多相系相互作用による新機能材料の創製，化学工業，**37**(10)，820-823，1986.
21) K. Mukae *et al., Jpn. J. Appl. Phys.,* **16**(8), 1361, 1977.
22) 柳田博明：セラミックスの二次元設計，化学と工業，**39**(11)，257-259，1986.
23) 宮山　勝・柳田博明：ガスセンサー材料開発の新しい展開，電気化学，**50**(1)，92-98，1982.
24) 柳田研究室，未発表.
25) H. Yanagida and Y. Nakamura : Humidity Sensors Made of CuO - ZnO Hetero-contact, presented at the 87th Annual Meeting of the American Ceramic Society, 4-E-85, May 6, Cincinnatti, 1985.
26) 柳田博明：工学部ニュース，No. 195，860601，p. 1，1986.

2 半導体材料，プロセス，デバイス，集積回路の設計

東京大学工学部電子工学科教授　菅野　卓雄

2.1 はじめに

本章では半導体材料，プロセス，デバイス，集積回路について，設計という概念がどのようにとり入れられているか，進歩してきているかを述べる．本書の統一テーマが「工学における設計」で，前章の材料設計からはじまって建築の設計まで，非常に広範囲にわたる話題がとりあげられている．各章の内容から工学の各分野における設計が概念的にも，あるいは手法に関しても，かなり共通的なものがあることが理解できる．集積回路の設計のさいのデータベースの活用，知識ベース的な手法，あるいは設計に対する人工知能の導入など，船の設計の場合にも半導体集積回路の設計の場合にも，かなり共通した面がある．

本章の内容としてまず，半導体技術における設計の重要性を述べた後，半導体デバイスや，集積回路に使う半導体材料をどのように設計するかを述べる．今日の時点で半導体材料は必ずしも完璧に設計ができるわけではないが，そこにはやはり設計という概念がある．特に比較的簡潔に設計が可能なのは，Ⅲ・Ⅴ族半導体のエネルギー帯構造の設計である．これは後にエネルギー帯構造設計という節を設けて詳しく述べる．シリコンに関してもまだそれほど概念的に確立されているわけではないが，シリコン結晶の設計が重要であることは最近強く認識されている事柄である．シリコンはもう非常に成熟した材料であって，なにもいまさらシリコンの研究をという印象があるかも知れないが，シリコン結晶の性質はたいへん微妙なものであって，決してできあいのシリコン・

ウェーハをもってきて1Mビット DRAM や4Mビット DRAM がすぐできるわけではなく，非常にきめの細かいシリコンのウェーハに対する設計という概念が現在でき上がりつつあるということを強調しておきたい．

つぎに，シリコンのウェーハやⅢ・Ⅴ族半導体のウェーハを使ってデバイスや集積回路をつくるときのプロセス技術をとりあげる．半導体プロセス技術は大部分が化学的なあるいは冶金的なプロセス技術であり，経験的な色彩が強く，試行錯誤的な方法がとられることが従来多かったが，プロセスがだんだん複雑になるに従って，試行してみること自体に経費が嵩み，結果が出てくるまでにたいへん時間がかかるので，半導体のプロセス技術に設計という概念を導入し，いろいろなことを試行しないでも済むようにしたいという努力が最近払われてきている．実験をやらないでも，その結果がなるだけわかるようにしたいという動機がどの分野の設計にも共通していると考えられる．

半導体デバイスの設計技術は歴史が長くて，半導体デバイスの動作の解析とか，動作を理解するということから出発して，つぎは所要の特性をもつデバイスをつくろうとしたらどのようにしたらよいか，といういわゆる設計はかなり昔から行われていることであり，半導体電子工学の中で設計という概念がおそらく一番最初に確立した分野ではないかと思われる．

本章の最後に半導体集積回路の設計を述べる．最近 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) が注目されているが，集積回路の設計技術が確立してきたので集積回路の応用範囲が拡大し，その波及が非常にすみやかに現在行われつつある．日本が DRAM で世界市場の大きなシェアを占めたのに対して，こういう ASIC 等設計技術が重要な割合を占める分野では日本は比較的弱いのではないかといわれている向きもあるが，わが国でも特に最近注目され力が入れられている分野である．

2.2 半導体技術における設計の重要性

半導体のプロセスと農業とを比較するということは，私の発想ではない．日本でも半導体農業論というようなことをいっていた方もおられ，また，Is Semiconductor Electronics Agriculture？という立て看板が，以前アリゾナ大

学を訪ねたとき，電気工学科の玄関を入ったところにあり，アメリカでもやはり同じような話があると思って興味をもった次第である．誤解のないようにここで強調しておきたいことは，半導体農業論といっても決して農業を蔑視しているわけではなく，以下に述べるように初期の半導体技術では製品の完成までに時間がかかり，かつ最後まで成否が不明の点が農業に似ているという意味である．

集積回路技術は，いわば先端産業の花形であって，クリーン・ルーム等の非常に高級な施設を使い，高性能の設備を使用する．製品の特性もDRAMのアクセス時間が数十ナノ秒を割るとか割らないとか，ゲートのスイッチング時間が数十ピコ秒であるとか，周波数でいえばギガヘルツになるというように，テクノロジーとして極限をきわめているという印象がある．

このような集積回路を製作する場合にふた昔前の状態を考えてみると，先ほど述べたようにデバイスのほうは大体こういう寸法のものをつくろうという設計をし，シリコンなりGaAsなり，とにかく与えられた材料を使って製作してみるのが普通であった．最後のプロセスまで終了し，性能試験をしてみて，その性能が期待どおりのものになっているか否かを知ることができる．したがって，集積回路に対する仕様が決まってから実際にものができてくるまでに，数ヵ月から半年ぐらいの時間，俗にいうターン・アラウンド・タイム(turn-around time)があって，それは全く農業的なスケールで，1日や2日でできてくるわけではない．しかも農業と同じように，最後になってみないとうまくいったかどうか結果がよくわからない．最後になってその特性を測ってみてやっと，これは目的に合ったものかどうかがわかる．否であれば，もう一度条件を変えてやり直すことになるわけで，そのターン・アラウンド・タイムが非常に長いということが半導体技術にとって大きな問題の1つであった．

このターン・アラウンド・タイムを縮めるためにさまざまの努力がなされたが，その1つとしてなんとかして過去の経験の蓄積をうまく使おうということで，データベースを整備することも行われたし，そういったデータベースから蓄積されている技術的な情報を引き出してくるために，知識ベース的な構成にすることも必要と考えられている．

大規模集積回路のごときものを設計するのには大変な時間がかかる．たとえ

ばかなり初期の話であるが，Intelの8086というマイクロプロセッサ・チップの設計に，レイアウトだけで13人・年かかったといわれる[1]．Motorolaの68000というマイクロコンピュータ・チップの設計には52人・年かかったということで[1]，機械的に考えるとこのマイクロコンピュータ・チップを1人で設計したら52年間かかることになって，これは全く非実際的なことはいうまでもない．それでは100人かかれば半年で済むかというと，設計者の間のコミュニケーションの問題があるから，そういうわけにはいかない．そこで設計支援機器(ツール)なり設計ソフトウェアなりを整備し，いわゆるコンピュータ支援設計(Computer-Aided-Design)が必要となる．最近注目されている自動設計，シリコン・コンパイレーションといわれているのは，コンピュータ支援設計ではなく，もっと進んだものである．コンピュータ支援設計ではやはり人間が主体で，重要な判断は人間が行い，コンピュータはあくまで道具として使うことを意味する．コンピュータはいろいろな意味の道具であって，グラフィック・エディタのような使い方もあるであろうし，あるいはシミュレーションに使用する場合もあろうが，重要なステップでの判断は人間が行う．これに対し当然のことながら高級な言語で記述された仕様に基づいて回路の設計を行い回路パターンまでは自動的に出力してほしいという要求がある．その場合人間は入力だけを行って，あとは脇役に退き，重要な判断はコンピュータが行って最後の答えを出すことが期待されている．これが本当の意味での自動設計であり，シリコン・コンパイレーション(Silicon Compilation)といわれる概念である．現時点ではこのような完全自動設計は完成していないが，各段階での設計技術は次第に確立されてきつつあり，かつそれを総合して一貫した設計を行おうとする努力も払われている．ここでは主として半導体集積回路を対象にし，半導体技術において設計という概念がどのように確立されつつあるか述べることにする．

2.3 半導体材料の設計

ひと昔前かふた昔前のころを考えてみると，電子デバイスに使う半導体材料は，たとえば純度でいえば99.9999％とか99.99999％程度でなければいけない，

格子欠陥もできるだけ少ないものでなければいけない，もちろん伝導型の制御もできなければいけないということで，当時の半導体材料技術では半導体材料の選択の余地はあまりなく半導体材料は与えられたものとし，それを使ってなんとかしてデバイスを実現しようというのが，デバイス技術者に対して与えられた仕事の条件であったと思う．

現在，半導体集積回路に使用する半導体はシリコンが量的には圧倒的に多いが，その理由はシリコン・プロセス技術がかなり成熟しており，シリコン・デバイス，したがってそれを用いて構成した半導体集積回路の特性もかなり優れたものが得られるようになってきたからである．

しかし，シリコンの技術がこのように非常に進歩して，シリコンのもっている特性を最大限使うことができるようになると，さらにⅢ・Ⅴ族半導体を使って，より高性能のデバイスや集積回路が得られないかということになり，次第に新しい材料が注目されるようになった．そして，ある材料を使ったら本当にどのような特性のデバイスが得られるのかが検討され，さらに，ある特性のデバイスを実現するためにどういう特性の材料を必要とするかということが重要な課題になり，このような観点でⅢ・Ⅴ族半導体の材料設計が行われてきている．

半導体デバイスの立場から重要な半導体の性質の1つは，半導体中でのキャリア，主に電子であるが，その速度の電界依存性である．これはレーザーなどの場合には決してよい指標ではないが，たとえば電界効果トランジスタの場合には重要な1つの特性である．

図2.1は，横軸に電界の強さ(kV/cm)をとり，縦軸に電子のドリフト速度(cm/sec)をとっているが，シリコンやゲルマニウムの場合などには電界が強くなると電子のドリフト速度が飽和して，1×10^{7} cm/sec以上の速度を得ることはできない．それに対してGaAsの場合には，低電界での電子のドリフト速度はシリコン中の7〜8倍であるが，高電界になるとほとんどシリコン中の値と一致してくることがわかっている．$Ga_{0.47}In_{0.53}As$などになると，高電界では電子のドリフト速度はシリコン中とほとんど一致するが，ドリフト速度の最大値が非常に大きくなる．InPの場合には低電界での電子のドリフト速度はGaAsよりも小さいが，高電界での電子のドリフト速度がGaAs中よりも大き

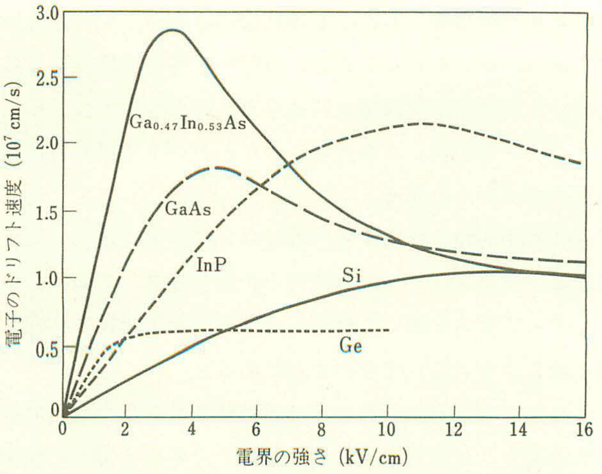


図 2.1　種々の半導体中での電子のドリフト速度の電界依存性

い．こういう特性からして，どんなデバイスの特性が予測できるかということが1つの興味ある問題である．

表2.1はゲート長1ミクロンのショットキー・ゲート電界効果トランジスタをシリコン，GaAs，InPの半絶縁性基板の上につくることができたと仮定した場合の性能の比較を理論的に行ったものである[2)]．シリコンの場合は半絶縁性の基板を得ることは容易ではないが，表2.1に示した理論計算は材料のもっている性質を極限的にあらわすという意味で行われたものである．f_Tは電流伝達率の特性周波数であるからディジタル回路にそのデバイスを使用したときのスィッチング速度に相当する周波数であり，f_{max}は電力利得の特性周波数であるからそのデバイスで増幅器とか発振器のようなアナログ回路を構成したときの使用可能な最高周波数に相当する．

表2.1に示した結果からいえることは，シリコンを基準にすると，ディジタル・デバイスとしては，その動作速度に関してはGaAsを使用することにより2倍程度の改善が得られ，InPを使用すると3倍近い改善が得られることが期待されることである．ところがアナログ・デバイスとしてはGaAs電界効果トランジスタが最もいい特性をもっている．これは前述の電子のドリフト速度の電界依存性との対応をつけて考えると，ディジタル・デバイスの場合には

表 2.1 Si, GaAs, InP ショットキー・ゲート電界効果トランジスタの性能比較(理論計算値)[2)]

	f_T (GHz)	f_{max} (GHz)
Si	6.2	23.0
GaAs	13.1	59.1
InP	20.1	40.1

ゲート長 1 μm, ドレイン電圧 5 V, ゲート電圧 0 V.

ドリフト速度の最大値が重要な物理量であることがわかる．一方 f_{max} に対しては強電界での飽和速度と低電界での移動度が重要な量であることがわかる．したがってディジタル・デバイスとして動作速度の速いものを得るには，強電界での電子の飽和速度が大きい物質よりも，ドリフト速度の最大値が大きい物質を使用すべきということになり，材料の設計もそのように行うべきということになる．

またレーザーを製作する場合には直接遷移型の半導体で，かつ Γ 点での禁制帯幅が所要の出力光波長に相当したものを半導体素材として使用しなければならないので，半導体材料の設計は重要な問題である．

一方シリコンも元素半導体であるので伝導型や導電率の値以上に材料設計の行いようがないかというと決してそうではなく，酸素や炭素の量を制御して所要の機械的性質や格子欠陥の発生が得られるように設計をする必要がある．

ここではこれらのIII・V族半導体のエネルギー帯構造の設計およびシリコンの機械的，電子的性質の設計について述べる．

2.3.1 III・V 族半導体のエネルギー帯構造の設計

GaAs や $Ga_xIn_{1-x}As$ のようなIII・V族半導体のエネルギー帯構造を検討してみる．図 2.2(a) は GaAs のエネルギー帯構造であるが伝導帯の最低エネルギー点がちょうど Γ 点にあって，そこでの禁制帯幅が約 1.43 eV(エレクトロン・ボルト)である．ところがこれにかなり接近して約 0.36 eV 上に第 2 の極小点があることが，図 2.1 に示した電子のドリフト速度の電界依存性で，GaAs 中での電子のドリフト速度に最大値が存在し，かつ飽和速度が比較的小さい原因になっている．それに対して図 2.2(b) に示す GaP のエネルギー帯構

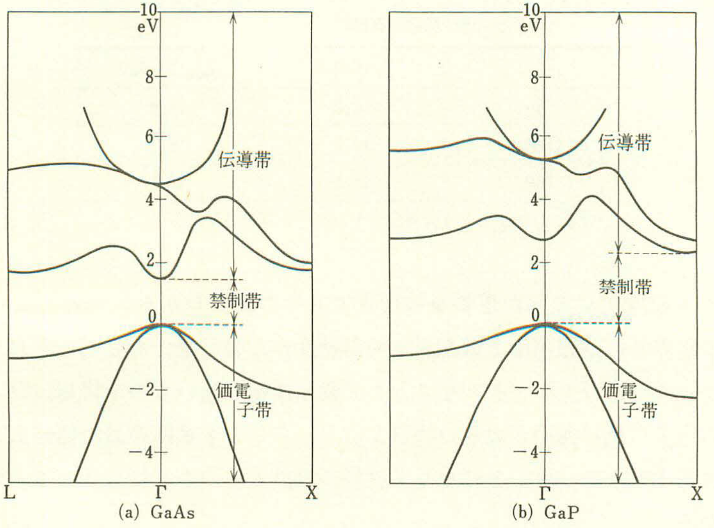


図 2.2　Ⅲ・Ⅴ族半導体のエネルギー帯構造例

造はシリコンと似ていて伝導帯の最低エネルギーがΓ点にない．

Ⅲ・Ⅴ族半導体で非常に興味があるのは，GaAs や GaP のごとき 2 元半導体のほかに $GaAs_x P_{1-x}$ $(0 \leq x \leq 1)$ のような 3 元半導体や $In_y Ga_{1-y} As_x P_{1-x}$ $(0 \leq x, y \leq 1)$ のごとき 4 元半導体を多くの場合形成し，そのエネルギー帯構造も x や y の値の変化に対し，図 2.3 に示すように連続的に変化する．図 2.3 では左端が GaAs，右端が GaP であり，E_Γ はΓ点における禁制帯幅である．また E_L は L 点における伝導帯と価電子帯間のエネルギー差，E_X は X 点における伝導帯と価電子帯の間のエネルギー差である．E_Γ などを見ると多少曲線になっているが，第 1 近似としては直線的に変化しているとして差し支えない．しかも特徴的であるのは，Γ点における禁制帯幅の変化が最も大きく，E_X などは組成変化に対してあまり依存しない．

したがって成分比を変えていくと，Γ点における禁制帯幅が最も大きく変わり，X 点や L 点における禁制帯幅はあまり変わらない．したがって，ちょうど X 点での禁制帯幅とΓ点の禁制帯幅の値が一致して，$x < 0.44$ でいわゆる間接遷移型の半導体になって，レーザー用には向かないことになる．

さらに電子移動度を大きくしたいという観点から考えると，移動度が有効質

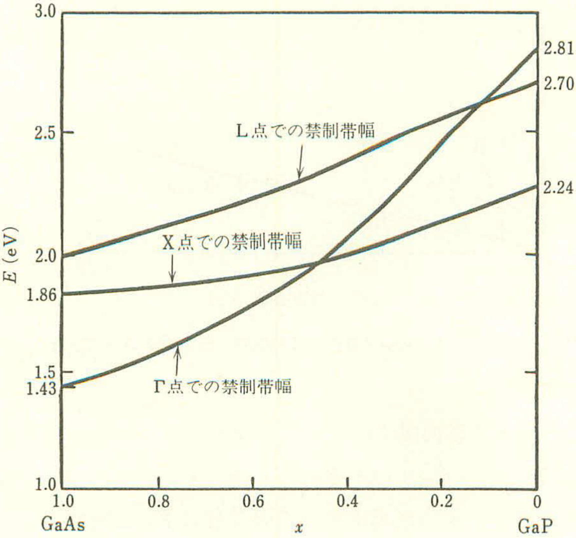


図 2.3　$GaAs_xP_{1-x}$ のエネルギー帯構造

量の逆数に比例するということから，電子がΓ点にいればその有効質量も小さくて移動度は大きいが，X点とかL点では有効質量は大きくなるので高移動度半導体のエネルギー帯構造として電子がX点やL点に存在するような構造はあまり向かない．

一方Γ点における禁制帯幅が変化することによって，Γ点での有効質量の変化を見ると，禁制帯幅に対し図 2.4 に示すように，ほとんど直線的に変化することが理論的，実験的に明らかになっている．

したがって，前述のような特性に重要なⅢ・Ⅴ族半導体の性質を抽象化して考えると，つぎのような性質があることがわかる[3)]．

(1)　価電子帯は Zincblende 型のⅢ・Ⅴ族半導体すべてに共通である．

(2)　伝導電子の有効質量はΓ点での禁制帯幅に比例する．

(3)　禁制帯幅の圧力依存性はすべての Zincblende 型Ⅲ・Ⅴ族半導体に対して等しい．

(4)　禁制帯幅の変化は組成に対して直線的に変化する．

すなわち，まず第1に種々の Zincblende 型のⅢ・Ⅴ族半導体，エネルギー帯

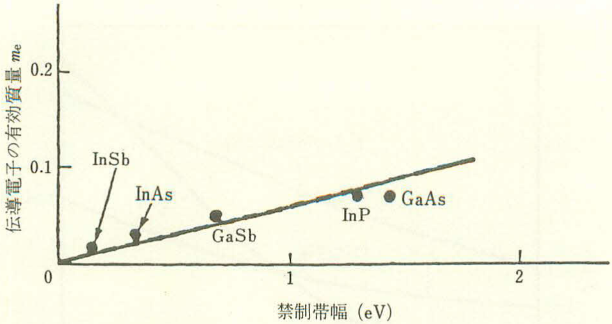


図 2.4 直接遷移型Ⅲ・Ⅴ族半導体の禁制帯幅と伝導電子の有効質量との関係

構造を見ると，価電子帯の様子はそれほど変わらないから，価電子帯の構造はすべての Zincblende 型Ⅲ・Ⅴ族半導体に共通であるとしてよい．第 2 は図 2.4 に示したように Γ 点にある伝導電子の有効質量は E_Γ に比例する，と考えて差し支えない．第 3 に組成を変更すると E_Γ，E_X，E_L の値がそれぞれ変化したが，組成を変えるということ，たとえば GaAs から GaP に向って $GaAs_x P_{1-x}$ で x を変えていく，つまり As を P に置き換えるということはⅤ族の元素を原子半径の小さな構成原子で置き換えているので，それは GaAs の原子に圧力をかけた場合と等価になると考えられる．これはⅤ族原子に限らず，Ⅲ族原子でも同様で，原子半径の小さな原子で置き換えるということは，その結晶に圧力をかけたことと等価であると考えて，その圧力に対する禁制帯幅の依存性はすべての Zincblende 型のⅢ・Ⅴ族半導体に共通であるとして，その値は以下の式に示すごとくであるとする．ここで p は圧力である．

$$\frac{dE_\Gamma}{dp} = 8.5\sim14\times10^{-6}\,\mathrm{eV\,bar^{-1}} \tag{2.1}$$

$$\frac{dE_X}{dp} = 5\sim5.5\times10^{-6}\,\mathrm{eV\,bar^{-1}} \tag{2.2}$$

$$\frac{dE_L}{dp} = -1.0\sim1.5\times10^{-6}\,\mathrm{eV\,bar^{-1}} \tag{2.3}$$

第 4 として禁制帯幅の変化が組成に対して直線的に変わるというようなことは，たとえばⅢ族元素 A^{III}，B^{III}，Ⅴ族元素 C^{V} よりなる 3 元Ⅲ・Ⅴ族半導体

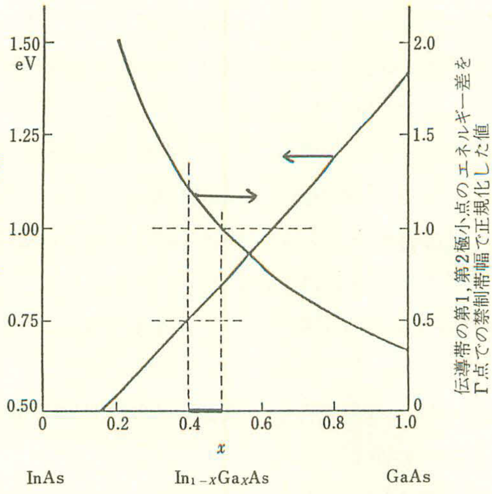


図 2.5　$In_{1-x}Ga_xAs$ の組成によるエネルギー帯構造の変化

$A_x^{III}B_{1-x}^{III}C^V$ の Γ 点での禁制帯幅 $E_{\Gamma ABC}$ は，2 元Ⅲ・Ⅴ族半導体 $A^{III}C^V$，$B^{III}C^V$ の Γ 点での禁制帯幅をそれぞれ $E_{\Gamma AB}$，$E_{\Gamma BC}$ とした場合

$$E_{\Gamma ABC}=x\,E_{\Gamma AC}+(1-x)\,E_{\Gamma BC} \tag{2.4}$$

であらわされるとすることである．

つぎに上述のごとき性質を利用してたとえば電界効果トランジスタ用の電子のドリフト速度の最大値の大きな半導体を得たいと思った場合に，半導体材料をどのように設計したらよいか説明する．

図 2.5 はその 1 例であって $In_{1-x}Ga_xAs$ Ⅲ・Ⅴ族半導体のうち，上記観点から最適の x を見出そうとするものである．まず前記の第 2 の性質により InAs から次第に GaAs に向かって組成が変わるにつれて Γ 点での禁制帯幅がどのように変わっていくかが InAs と GaAs の禁制帯幅が既知であるからわかり，図 2.5 の右上りの曲線になる．つぎに Γ 点における禁制帯幅で L 点か X 点にある第 2 極小点までのエネルギー ΔE を正規化した値が組成変化とともにどう変わるかということが図 2.5 の右下りの曲線として得られる．前述の第 2 の性質をそのまま適用すれば各曲線は直線と考えることになるが，実際には若干このように曲線になる．

まず材料の選び方の観点として，禁制帯幅があまり小さいと非常に使いにく

い．それはpn接合を作成した場合に，飽和電流が大きくなるからである．シリコンの場合禁制帯幅は約1.1 eVであるから，飽和電流の観点からは禁制帯幅としては1 eVくらいが使いやすいわけであるが，もう少し禁制帯幅の小さいほうまで検討してみる．その理由は第2の性質として知られているように禁制帯幅が小さいほうがΓ点での電子の有効質量が小さいことがわかっているから，したがって電界効果トランジスタ用の材料としては電子の有効質量が小さく，ドリフト移動度の大きいほうがよいからである．シリコンの禁制帯幅よりも小さい禁制帯幅としてはゲルマニウムの禁制帯幅が約0.7 eVであったことを考えると，禁制帯幅として0.75 eVくらいまで許容できるのではないか考えられる．そうすれば，この条件から決まるxの値は図2.5から，約0.4より大きい値になることがわかる．

一方でドリフト速度の最大値をできるだけ大きくしたいという要求がある．ドリフト速度の最大値を大きくするためには，ΔEを大きくして，電子が有効質量の大きな第2極小点に遷移しないようにすればよいが，Γ点での禁制帯幅よりもΔEのほうが大きければ電子が第2極小点に遷移する状態のときには，価電子帯からの電子を励起していわゆる衝突電離を起こす可能性がある．そこで$\Delta E/E_\Gamma$の値を1よりも大きな値に選べばGaAsで起きたように強電界下でドリフト速度が減少することは避けられる．

図2.5から明らかなように，$\Delta E/E_\Gamma$の値を1よりも大きくするためには$x<0.5$に選ばねばならない．幸いなことに，$x=0.47$とするとちょうどこの条件を満足するし，そのときの格子定数はInPの格子定数と等しくなるのでInP基板上に$In_x Ga_{1-x} A_s$をエピタキシャル成長させることができて，300 Kで$10^4\ cm^2V^{-1}s^{-1}$に及ぶ電子のドリフト移動度が得られている．

2.3.2 シリコン・ウェーハの設計

シリコンはいうまでもなく元素半導体であるから，前項のごときエネルギー帯構造の設計の自由度はないが，現在シリコン結晶中の酸素，炭素濃度については詳細な設計が行われている．集積回路製作に使用するシリコン結晶は欠陥が少なく，きわめて純粋なものであるといわれる．確かに電気的な特性に非常に大きな影響を与えるようなⅢ族とかⅤ族の元素に限っていえば，その密度を

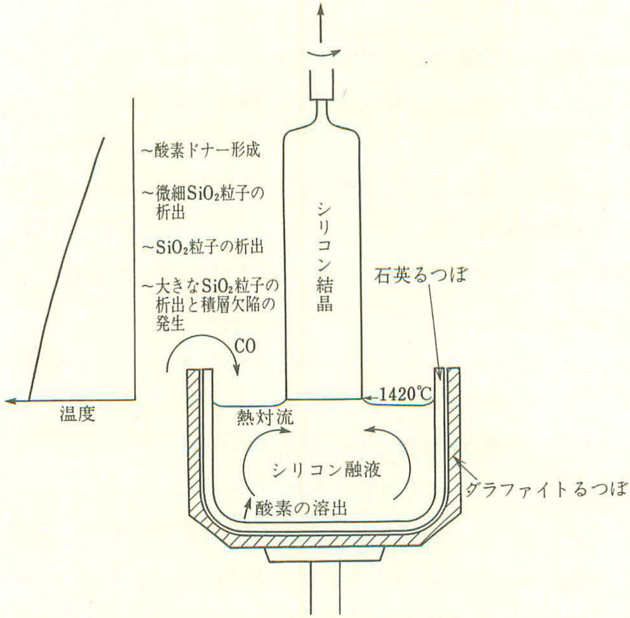


図 2.6 シリコン結晶引上げ法の原理とシリコン中酸素の振舞い

きわめて小さくして 10^{10}~10^{13} cm^{-3} 程度にすることができるが，通常いう意味での導電性にあまり影響を与えないような酸素とか炭素などの濃度になると，これはかなり大きくて 10^{17}~10^{18}cm^{-3} の程度である．図 2.6 はチョクラルスキー (Czochralski) 法でシリコンの結晶を引き上げていく場合の様子を模式的に描いたものである．石英のるつぼの中でシリコンを溶かしてシリコン結晶を引き上げるわけであるが，その外側にグラファイトのサセプタがあるので，炭素が混入しやすい．また石英がシリコンに溶け込むので，酸素が混入する．口径の大きい長い結晶になるほど引き上げられた結晶の熱履歴は複雑であり，たとえば上端と下端とでは受ける温度履歴が非常に違う．すなわち，固液界面近傍ではシリコン結晶の温度は融点に近く，引き上げが終わればかなり早く冷却するから，下端のほうでは低温状態を経過する時間はわりに短い．これが結晶の上端になると数百度の状態に保持される時間は非常に長くなり，こういう意味で上端と下端とでは熱履歴が全く異なる．

しかもシリコンの中の酸素の振舞いはたいへん複雑でつぎに示すごとくであ

る．

(1)　400～500 ℃：酸素ドナーが形成される．これは当初シリコン結晶の導電率のゆらぎを大きくした原因である．酸素原子の集合体によると思われる．

(2)　600～700 ℃：酸素の析出が観測され，rod 状の coesite と 20 Å くらいの無定形物質である．

(3)　800～1000 ℃：100～5000 Å のプレート状の無定形 SiO_2 粒子が形成される．

(4)　1000 ℃：転位を伴ったプレート状の SiO_2 が析出し，積層欠陥を生じる．

(5)　1200 ℃：無定形 SiO_2 の大きな析出物を生じ，積層欠陥を生じる．

上記温度範囲はいずれも半導体集積回路の製造プロセスで多く使用される温度であるので，ウェーハとして供給された状態では 650 ℃ の低温熱処理で酸素ドナーを消滅させ，450 ℃ 付近を急速に通過させて，酸素ドナーの再発生を防止してあっても，半導体集積回路が製作された時点では SiO_2 が析出したり，欠陥が発生したりしていることは考えられ，かつプロセス途中で，酸素のウェーハ外への拡散が起きるので，酸素が関与した現象はウェーハの厚さ方向で変わるはずである．

集積回路をつくるのにシリコンが何べんも何べんも熱処理を受けるということを考えると，最初のウェーハが全く転位や点欠陥のないようにきれいなものであっても，最後に集積回路ができ上がったときには SiO_2 の析出などが起きる．本来，最終的な特性が所要のものであるように，あらかじめ酸素なり炭素なりの濃度を設計しておく必要がある．最近シリコン中での酸素の析出のシミュレーションが行われているが[4)]，本格的なシミュレーション・プログラムはまだ開発されていないようである．現実には経験的に，実験データに基づいて酸素濃度や炭素の濃度が選ばれている．

しかし，シリコン中の酸素や炭素の集積回路の特性に及ぼす影響は集積回路の製作プロセスによっても異なる．

シリコン中の酸素や炭素の振舞いがそのように複雑であるならば酸素や炭素の量を減らせばよいのではないかと考えられるが，酸素量には適正値があって

減らせばよいというわけではない．さまざまの熱処理をしたときにウェーハがどうしても変形する．極端なことをいえば，直径 10 cm のウェーハを 1000 ℃に加熱しておいて，急冷すれば非常に大きな熱歪が観測される．しかし，その変形量は酸素濃度を増すに従って減る．ウェーハの機械的な性質をよくするという要求と，電気的にキャリアの発生・再結合中心になるような SiO_2 の析出を少なくすることとは明らかに相反する．そこで最適設計が必要になってくる．この酸素の析出の様子も炭素の存在に強く依存するので，炭素と酸素の濃度の決定がシリコン・ウェーハ設計という観点から非常に重要な設計の対象である．

2.4　半導体プロセスの設計

これらの半導体ウェーハを使ってつぎにデバイスを作成することになるが 1 例としてここではシリコン・ゲート *n* チャネル E/D MOS インバータの製作プロセスの概略を述べる．

基板としては (100) 面をウェーハ面とする電気抵抗率 5〜10 Ω・cm の p 型シリコン・ウェーハを使用する (図 2.7 (a))．まず，Si_3N_4/SiO_2 膜をマスクにしてほう素イオンを打ち込んで p 型のチャネル・ストッパを形成する (図 2.7 (b))．つぎにこの Si_3N_4/SiO_2 膜をマスクにして熱酸化によりフィールド酸化膜を形成した後，フォト・リソグラフィでソース，ドレイン，チャネルすなわち MOS 電界効果トランジスタを形成する領域を一体として，フィールド酸化膜を除去し，あらためてゲート酸化膜を形成する (図 2.7 (c))．

このゲート酸化膜に後にデプリージョン型トランジスタのソースとなるべき位置の一部に窓をあけ，そのままの状態でエンハンスメント型 MOS 電界効果トランジスタの閾値制御のためにほう素イオンをゲート酸化膜を通して打ち込む (図 2.7 (d))．

つぎにエンハンスメント型 MOS 電界効果トランジスタ領域をフォトレジストで保護し，デプリージョン型 MOS 電界効果トランジスタのチャネル領域に閾値制御用のひ素イオンを打ち込むが，打ち込む領域はデプリージョン型 MOS 電界効果トランジスタの動作を確実にするためには，むしろソース，ドレイン領域と重なったほうがよいので，このマスク合せは十分余裕のあるもの

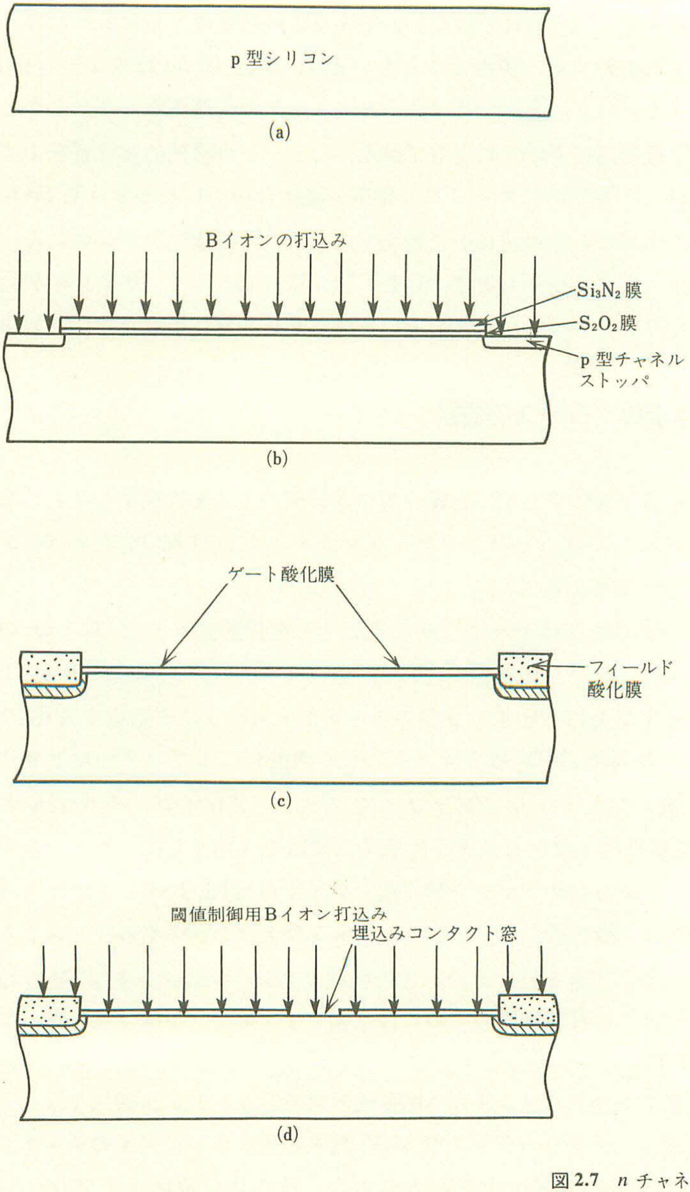
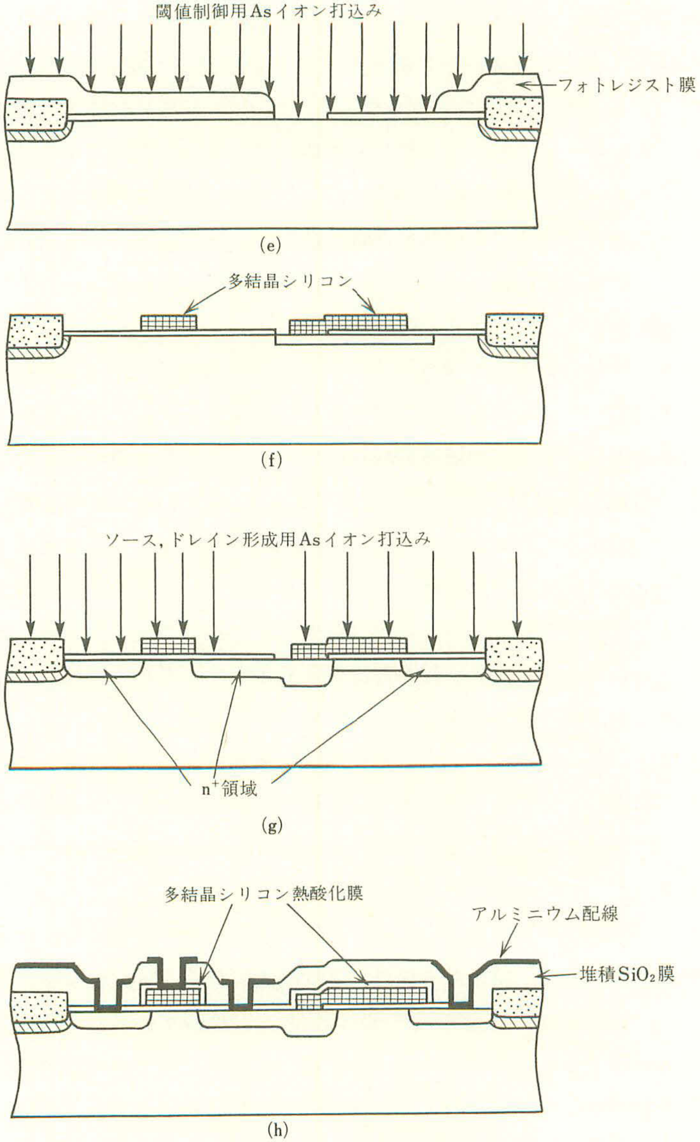


図 2.7　n チャネル MOS


閾値制御用Asイオン打込み
フォトレジスト膜
(e)
多結晶シリコン
(f)
ソース，ドレイン形成用Asイオン打込み
n⁺領域
(g)
多結晶シリコン熱酸化膜
アルミニウム配線
堆積SiO_2膜
(h)

集積回路製作プロセス

である(図2.7(e))．フォトレジストを除去した後ウェーハ全面に多結晶シリコンを堆積し，ゲート電極および配線のパターンに従い不要部分は除去する(図2.7(f))．この多結晶シリコンをマスクにしてひ素イオンを打ち込む，ひ素イオンのエネルギーはフィールド酸化膜や多結晶シリコンを通過するほど大きくはないが，薄いゲート酸化膜は通過して，シリコン基板に到達する．埋込みコンタクトの部分ではその後の熱処理時にひ素は多結晶シリコンを速やかに拡散し，シリコン基板に到達して n^+ 層を形成し，多結晶シリコンとシリコン基板との接触部をオーム性にする(図2.7(g))．

多結晶シリコンの表面を酸化，あるいは化学気相堆積法により SiO_2 膜を堆積して多結晶シリコンとソース，ドレインに接続するアルミニウム配線との間の層間絶縁物とする．この層間絶縁物にソース，ドレイン領域およびシリコンゲートとの間に接続窓をリソグラフィであけ，アルミニウムを蒸着し配線パターンにしたがって，エッチングする(図2.7(h))．最後に表面保護膜を堆積し，ボンディング・パッドの窓あけをしてウェーハ・プロセスとして完成する．

したがって，こういうデバイス・プロセスから考えてみてわかることは，そこではいろいろなプロセスが行われることである．すなわち酸化，イオン打込み，拡散，それから窓あけをするためのエッチングなどが行われる．特にバイポーラ集積回路の場合には必ずエピタキシャル成長というプロセスが入る．とにかく，酸化とか，イオン打込みと活性化，拡散というような高温プロセスが何回も何回も繰り返され，あるプロセスの場合にはその前のプロセスの結果が初期条件になって，そのプロセスが行われることになる．したがって，たとえば固体の中への不純物拡散ということを考えると，その分布はたとえば表面の不純物濃度が一定に維持される場合には補誤差関数的な分布になるとか，あるいは表面に厚さゼロの不純物層があり，これから拡散が行われる場合には指数関数的な分布になるとかいっても，それは，上述のごとく非常に理想化された単純な場合であって，前記のように何回かの高温プロセスが繰り返されると，とても簡単な解析的な表現を与えることはできない．そこでかなり任意の初期条件のもとでつぎのプロセスを行ったらどうなるか，ということを知るためにプロセス・シュミレータが開発されている．

2.4.1 半導体プロセス設計用シミュレーション・プログラム

プロセス・シミュレータの中には酸化，拡散，イオン打込みのほかにCVD (Chemical Vapor Deposition：化学気相堆積)，エッチング等を対象としたものがある．特に最近のように非常に小さなパターンを形成する場合，特に微細なパターンを転写するためにモノクロマティックな光で露光すると光の定在波の影響が出てくる．電子ビーム露光の場合には電子の後方散乱の影響が出てくる．このようなことをいちいち実験してみて断面を撮って調べるというようなことをしていると，時間がかかってどうにもならないので，プロセスで出てくる現象をシミュレーションしようということになり，プロセス・シミュレータが開発されたわけである．

現在までに多くのシミュレータの報告があるが，かなり広く使われているプロセス・シミュレータとしては，スタンフォード・ユニバーシティ・プロセス・エンジニアリング・モデル (Stanford University Process Engineering Model : SUPREM) と称するものがある[5)]．このようなシミュレーション・プログラムをつくるときに，どのくらい物理的なモデルをとり入れるかということは重要な問題である．

SUPREMにおいて，イオン打込みされた不純物の分布や，不純物の分布がどのように取り扱われているか以下に示す．

シリコン中にイオン打込みされた不純物の初期分布である半導体基板表面より z の位置での不純物密度 $C(z)$ は，不純物が燐やひ素の場合には

$$C(z) = C(R_m)\exp\{-(z-R_m)^2/2\sigma_1^2\} \qquad (2.5)$$

$$0 < z \leq R_m$$

$$= C(R_m)\exp\{-(z-R_m)^2/2\sigma_2^2\} \qquad (2.6)$$

$$R_m \leq z < \infty$$

ただし，

$$R_m = R_p - 0.8(\sigma_2 - \sigma_1)$$

で近似しており，不純物がありほう素の場合には，

$$\frac{dC(z)}{dz} = \frac{(z-a)}{b_0 + b_1 z + b_2 z^2} \qquad (2.7)$$

$$b_1^2-4b_0b_2<0$$

であらわされる分布にさらに打ち込まれたひ素イオン分布の先端に減衰距離 0.045 μm の指数関数分布を付加することにより，全分布をあらわしている．

このような不純物分布を初期条件として不純物拡散を行う場合，その不純物束 J_I は拡散項とドリフト項の和で表わして

$$J_I = D\nabla C(z) \pm DC(z)\nabla l_n(n/n_i) \tag{2.8}$$

ただし，複号のうち

正符号：アクセプタ

負符号：ドナー

とし，ここで電子密度 n は

$$n=\left\{N_I+\sqrt{N_I^2+4n_i^2}\right\}\Big/2 \tag{2.9}$$

N_I：正味のイオン化した不純物密度

n_i：真性状態での電子密度

で与えられるとしている．

拡散係数 D は種々の点欠陥との相互作用で決まるとして

$$D=D^x+\Sigma D^c N_x^c+\Delta D \tag{2.10}$$

ここで，

D^x：中性点欠陥との相互作用で決まる拡散係数

D^c：荷電状態 c にある点欠陥との相互作用で決まる拡散係数

N_x^c：空位ならびに自己格子間原子の密度の和を真性状態での密度で正規化した値

であらわしている．

実際の数値計算にはもう少し簡単な形を用いて，

$$D=D^*(1+\beta f_v)/(1+\beta) \tag{2.11}$$

ただし

$$f_v = n/n_i \quad \text{（ドナーに対し）} \tag{2.12}$$

$$= n_i/n \quad \text{（アクセプタに対し）}$$

$$\beta = D^c/D^x \tag{2.13}$$

を用いている．

SUPREM の有用性を示す 1 例としてこれらの拡散係数表示を用いて，複数

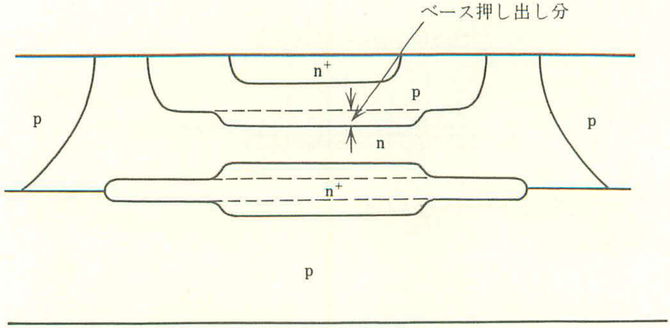


図 2.8　エミッタ拡散に伴う不純物の再分布

種類の不純物が存在したときの不純物拡散の変化の様子を計算することができることがあげられよう．

燐の高濃度拡散を行った場合，燐は他の不純物の拡散を助長する押し出し効果があることが知られており，バイポーラ・トランジスタのエミッタ接合形成時におけるベース領域の押し出し現象としてバイポーラ・トランジスタの設計上問題になる事柄である．この現象は燐と 2 価に帯電した空位との複合体が分解し，シリコン中の空位密度が増大するためと考えられているが，この物理的機構に基づいて，前記の拡散係数を計算することにより図 2.8 に示すように実際に起きる押し出し現象の大きさを求め，設計に反映させることができる．

シミュレーション・プログラムは本来そのプログラム構成時にとり入れられた物理現象以上に新しいことは出ないはずであるが，その複合効果というようなものを理解し，現実に起きている現象を理解する上でたいへん有効である．

2.4.2　半導体プロセス装置の機能のシミュレーション

半導体集積回路製造は一種の装置産業であるといわれるほど，製造プロセスにおいて製造装置の性能の寄与する度合は大きい．

各製造装置により要求される性能は異なるが，その性能を実現するために多くの場合かなり試行錯誤的な方法がとられるが，最近では半導体製造装置の機能についてシミュレーションも行われ，装置の設計に役立っている．ここではその 1 例として薄膜の化学気相堆積装置における膜厚の均一性を得るための設計を紹介する[6)]．

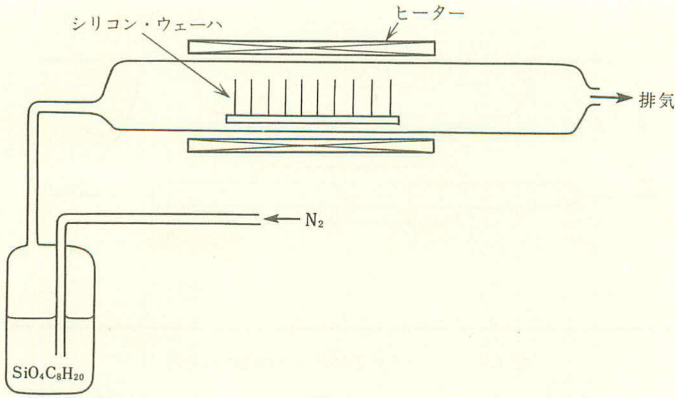


図 2.9　4 エチル・オルソ・シリケートを用いた SiO_2 の減圧化学気相堆積

図 2.9 に示すように横型の抵抗加熱炉を使用して TEOS (Tetra Ethyl Ortho-Silicate) を熱分解して SiO_2 を堆積させる場合，量産性を上げるということを考えると，ウェーハの直径は当然大きくなってきて現在 4 インチから 5 インチ，場合によると 6 インチとなり，さらにウェーハの枚数も数十枚ということになる．しかも析出する SiO_2 の厚さのウェーハ内の分布は均一であってほしいし，ウェーハごとのばらつきも減らさなければならないということになると，4 インチや 5 インチのウェーハ数十枚を炉の中に入れてこれらの条件を満足することは容易なことではない．この場合生じる主たる反応は

$$SiO_4C_8H_{20} \rightarrow SiO_2 + 4C_2H_4 + 2H_2O \qquad (2.14)$$

であり，その反応速度 r は

$$r = \frac{A}{k_B T(1+BP)} \qquad (2.15)$$

ただし

$k_B T$　：熱エネルギー

P　　：TEOS の圧力

A，B：P に依存しないパラメタ

である．

シリコン・ウェーハが TEOS の流れに対し垂直に立っているとき，(a) ガスのドリフト層はウェーハの外縁と反応管内壁との間にしか依存しない．(b) ウ

ェーハ表面のガスは停留しており，したがってTEOSは拡散でシリコン・ウェーハ表面に到達すると仮定する．

各ウェーハにより堆積膜の厚さが異ならないためにはすべてウェーハに対しTEOSの分圧が等しくなる必要がある．したがって z_{I} を単位時間当り反応管入口に供給されるTEOSの分子数，z_{G} を反応管壁やウェーハ表面で消費されるTEOSの分子数とした場合，

$$z_{\mathrm{G}} = \alpha z_{\mathrm{I}} \qquad \alpha \ll 1 \tag{2.16}$$

でなければならない．

u を標準状態での反応管入口での全ガス流量，P_t を全ガス圧とすれば

$$z_{\mathrm{I}} = \frac{P_0}{k_{\mathrm{B}}T} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{\overline{P}}{P_t} u \tag{2.17}$$

$$T_0 = 300\ \mathrm{K} \qquad \overline{P} = 760\ \mathrm{torr}$$

であり

$$z_{\mathrm{G}} = r \cdot F \tag{2.18}$$

$$F = 2\pi R_0 L + 2N\pi R_1^2 + F_c \tag{2.19}$$

ただし

R_0：反応管の半径

L ：反応管の長さ

R_1：ウェーハの半径

N ：ウェーハの枚数

F_c：キャリア・ガスとともに排出される分

とすることができる．

TEOSのウェーハ表面への拡散束 j_{D} は

$$\rho = R_1 \quad \text{で} \quad P = P_0 = \text{一定}$$

$$z = l, \qquad 0 \leq \rho \leq R_1$$

で

$$j_{\mathrm{D}} = -\frac{\partial P}{\partial z} \frac{D}{k_{\mathrm{B}}T} = r \tag{2.20}$$

であり，

$$z = -l, \qquad 0 \leq \rho \leq R_1$$

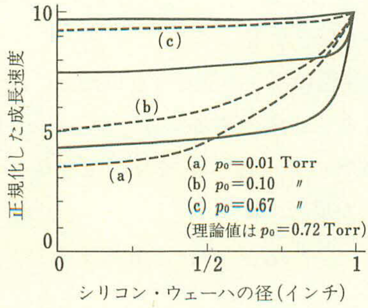


図 2.10　化学気相堆積 SiO_2 の膜厚分布の理論値(破線)と実測値の比較

で

$$j_D = \frac{\partial P}{\partial z} \cdot \frac{D}{k_B T} = r \tag{2.21}$$

であり，一般的な場合については数値計算されている．これによると P_0 を大きくし，P_t を小さくすることにより一様な厚さの堆積膜が得られることが予測され，図 2.10 に示したように実験的にも確かめられている．

このような半導体装置の設計は，化学工学的な研究としてやはり 1 つの非常に重要なテーマではないかと思われる．現在日本は半導体の DRAM の生産で世界市場で非常に大きな割合を占めているが，かつては生産装置は外国から購入したものが多かった．最近は日本で非常にいいものができるようになって，業界団体もできて，半導体製造装置産業は重要な産業として成長してきている．DRAM の生産などでは製造装置に対する依存性は非常に強いので，製造装置の設計は重要な問題の 1 つである．

2.5　半導体デバイスの設計

半導体デバイスの設計としては，その性能をきわめて精度よく算出するための精密設計と，極限的な寸法や新しい構造を有するデバイスの性能を予測するための設計がある．前者の例として，imref を用いた自己無撞着法が典型的である．

ここでは後者の例として，DRAM 用の短チャネル MOS 電界効果トランジ

スタの性能予測と絶縁物基板上のシリコン薄膜を用いた極短チャネルMOS型電界効果トランジスタのモンテ・カルロ法による性能予測の問題をとりあげることにする．

2.5.1 DRAM用短チャネルMOS電界効果トランジスタの性能予測

DRAMのごとき多量生産される半導体集積回路の場合には，動作速度を速くする等性能向上のためとチップ面積を小さくして経済効果を上げるために，そこで使用されるMOS電界効果トランジスタの寸法を小さくすること，特にチャネル長を短くすることが必要である．

その微細化限界はもちろん製造技術上の問題もあるが，性能上の制約もあり，デバイスの設計としてまず考慮すべきは後者である．

図2.11は簡単なDRAMセルのモデルでメモリ・セルとトランスファー・ゲートになるMOS電界効果トランジスタより構成されている．メモリ回路の構成としてはメモリ・セルにセンス増幅器が接続されており，その入力にビット・ライン・キャパシタンスが並列に接続されているような構成になっている．ごく単純に考えると，デバイスの寸法を小さくすればそれだけ動作速度が上がるように思われるが，DRAMでは，トランスファー・ゲートのチャネル長を短くしていくと，遮断状態での漏洩電流が増大して再書込みをたびたびしなければならないので，単体としてMOS電界効果トランジスタをどのくらいまで小さくできるか，というような議論をしてみてもあまり意味はない．したがって，DRAMのような回路構成でデバイスの寸法限界がどうなるかということを検討しなければならない．

DRAMの場合の1つの問題点として，回路電圧をどのくらいに設定するか

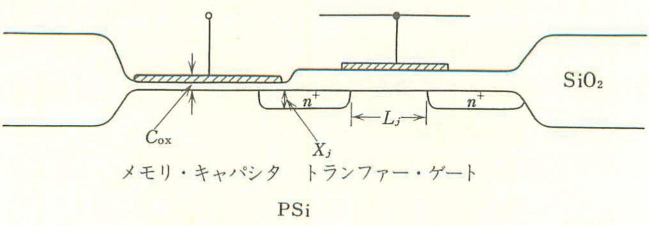


図2.11 DRAMメモリ・セルの構造概念図

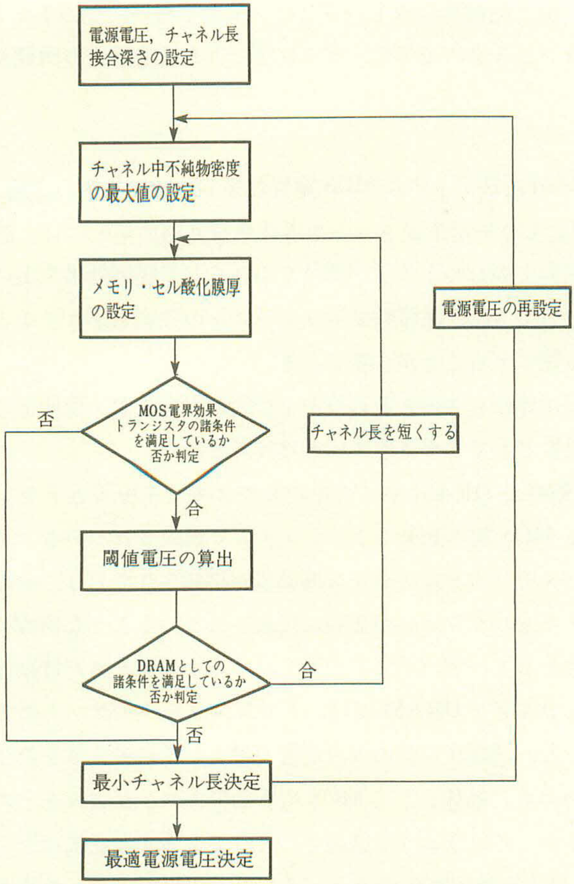


図 2.12　DRAM 用 MOS 電界効果トランジスタの最小寸法の決定手順

ということも，DRAM の設計上非常に重要である．現在少なくとも端子から見たときに 5 V が標準になっているが，電源電圧をどのくらいに選ぶかということも非常に重要な問題で，電源電圧を独立変数の 1 つとした短チャネル MOS 電界効果トランジスタの設計手順を図 2.12 に示す[7)]．ここでは計算機を使用した反復操作により最適値に到達するようにしている．

すなわちまず電源電圧 V_{dd} とチャネル長 L_j を仮定する．このときドレイン接合の深さ X_j はパラメタとする．

つぎにチャネルの不純物密度 N_{ch} をドレイン接合の電子なだれ降服電圧

V_{BD}で許容される最大値にまで上げる．このときV_{BD}はDRAMとしての動作の余裕を考えて

$$V_{BD} = 1.5\, V_{dd} \tag{2.22}$$

に選ぶ．

この条件のもとでメモリ・キャパシタの漏洩電流I_{cell}を計算する．

つぎにメモリ・キャパシタのシリコン酸化膜の厚さt_{ox}はシリコン酸化膜中の電界E_{ox}が

$$E_{ox} \leq 4.5\ \mathrm{MV/cm} \tag{2.23}$$

になるか，あるいはシリコン酸化膜を通して流れる電流I_{ox}が

$$I_{ox} \leq 0.01\, I_{cell} \tag{2.24}$$

になるかのいずれかで決める．

つぎにトランスファー・ゲート用MOS電界効果トランジスタが前記設計条件のもとで，パンチ・スルー現象，短チャネル効果，ホット電子効果を生じていないことを確かめた上で，サブスレッショルド電流I_{sub}を決定し，閾値電圧V_{th}を

$$I_{sub} = 0.01\, I_{cell} \tag{2.25}$$

で決めるが，このときトランスファー・ゲート用MOS電界効果トランジスタのゲート酸化膜の厚さt_{gate}は

$$t_{gate} = 3 \times t_{ox} \tag{2.26}$$

とする．

最後に雑音余裕，アクセス時間，ソフトエラー等DRAMとしての性能を算出する．

以上の設計プロセスより明らかなように，チャネル長やDRAMの性能はすべて電源電圧の関数になり，計算結果の1例を図2.13に示す[7]．

図2.13のハッチングの領域が，アクセス時間25 n sec以下，メモリ電荷100 fcを仮定したとき，MOS電界効果トランジスタのチャネル長として使用しうる値の範囲を示すが，この場合最小チャネル長は約0.5 μmである．

これはDRAM用MOS電界効果トランジスタの寸法限界が回路特性により決まることを示す重要な結論である．

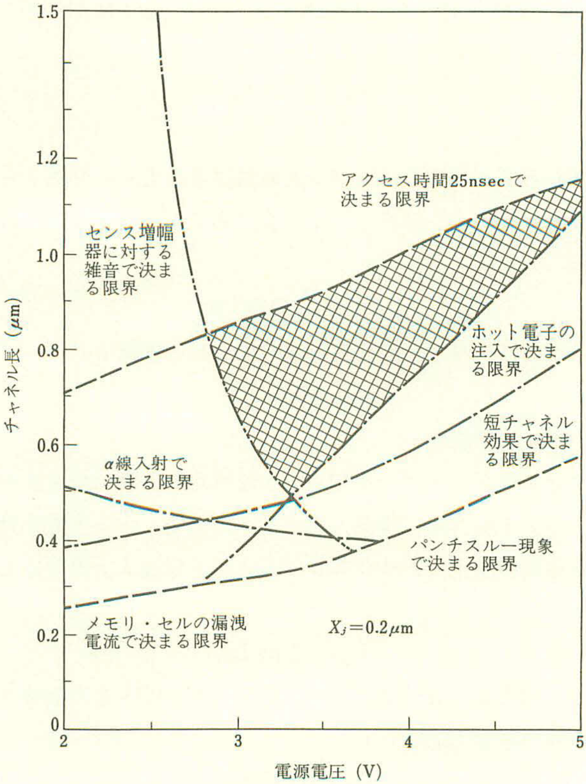


図 2.13 DRAM 用 MOS 電界効果トランジスタの最小チャネル寸法

2.5.2 モンテ・カルロ法による微小デバイスの特性予測

電界効果トランジスタのチャネル長やバイポーラ・トランジスタのベース領域の厚さが微細化し，キャリアの平均自由行程の程度になると，移動度や拡散係数の概念は成立しなくなり，モンテ・カルロ法を用いた粒子像に基づくデバイス・シミュレーションが必要になる．

ここでは図 2.14 に示す SOI 型の短チャネル電界効果トランジスタの特性をモンテ・カルロ法を用いてシミュレーションを行った結果を紹介する[8)]．

このさい考慮に入れた散乱機構と散乱確率の表示は下記のごとくである．

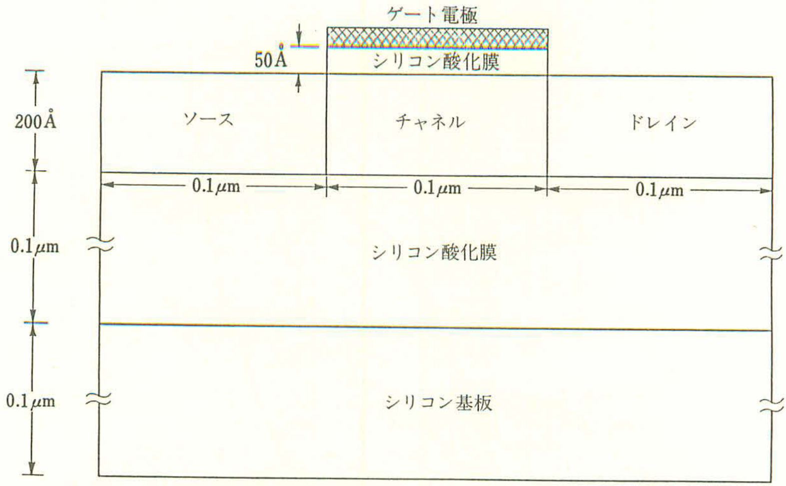


図 2.14 SOI 型短チャネル MOS 電界効果トランジスタの構造(© IEEE, 1986)

(1) 音響フォノンによる谷内散乱

$$P_{\mathrm{acoustic}} = (k_{\mathrm{B}}\, T D_{\mathrm{a}}^2\, m^* |k|)/(2\pi\hbar^3 \rho s^2) \tag{2.27}$$

D_{a}：変形ポテンシャル

ρ ：シリコンの密度

s ：シリコン中の音速

(2) 光学フォノンによる谷間散乱

フォノン吸収過程によるもの：

$$P_{\mathrm{absorption}} = \{3m^{*2} D_{\mathrm{a}}^2\, k_{\mathrm{B}}\theta_i/(\pi\hbar^4 C_1)\} \cdot (2/m^*)^{1/2} \cdot (E + k_{\mathrm{B}}\,\theta_i)^{1/2}\{\exp(\theta_i/T) - 1\}^{-1} \tag{2.28}$$

フォノン放出過程によるもの：

$$P_{\mathrm{emission}} = \{3m^{*2} D_{\mathrm{a}}^2\, k_{\mathrm{B}}\theta_i/(\pi\hbar^4 C_1)\} \cdot (2/m^*)^{1/2} \cdot (E - k_{\mathrm{B}}\theta_i)^{1/2}\{1 - \exp(-\theta_i/T)\}^{-1} \tag{2.29}$$

θ_i：谷間散乱フォノン温度

C_1: シリコンの弾性定数

(3) 界面散乱

x をチャネル方向，y を表面に垂直な方向，z を x，y に垂直，すなわちソース，ドレイン接合面に平行な方向として，$k\,(k_x, k_y, k_z)$ を電子の波

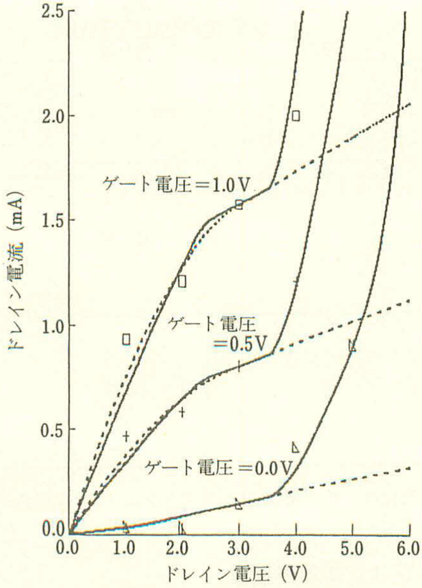


図 2.15 SOI 型短チャネルと MOS 電界効果トランジスタの特性(© IEEE, 1986)

動ベクトルとして

$$k'_x = k_x + \sigma R|k| \tag{2.30}$$

$$k'_y = \pm(|k|^2 - k_x^2)^{1/2} \tag{2.31}$$

$$k'_z = k_z \tag{2.32}$$

R：−1 から 1 までの実数で分散が 1，平均が 0 のガウス分布をしている実数

σ：フィッティング・パラメタ
（ここでは 10^{-4} とする）

＋：チャネルの裏界面での散乱の場合

−：チャネルの表界面での散乱の場合

(4) 衝突電離

$$P_{\text{impact}} = \{m^* q^4 / (\gamma \hbar^2 \varepsilon_{si}^2)\}(2m^*)^{1/2}$$
$$(1+\varkappa)^{-1} \cdot E^{-2} \cdot (E - E_{\text{th}})^{3/2} \cdot A \tag{2.33}$$

$\varkappa \quad = m^* / m_h^*$

$E_{\text{th}} = (1+2\varkappa)E_{\text{g}} / (1+\varkappa)$

E ：電子の運動エネルギー

E_g ：禁制帯幅

A ：フィッティング・パラメタ(10^2)

図 2.15 にゲート長が 0.1 μm の場合の電界効果トランジスタの特性を示すが，チャネルがパンチスルー状態にあってもゲートの制御機能のあることが確かめられている．

2.6 半導体集積回路の設計

半導体集積回路の設計はメモリ集積回路のごとく 1 品種で多量に生産され，価格競争の激しいもの，超高速コンピュータ用の論理集積回路のように第一義的に重要視されるもの，最近の ASIC のように必然的に多品種少量になり，かつ仕様が決定してから半導体集積回路チップが出来上がるまでの時間が短いことが特に重要視されるもの等の点ではそれぞれ設計の方法が異なるが，ここではまず半導体集積回路の設計方法の原理的な考え方を述べ，今後の発展の方向についても付言することにする．

2.6.1 設計の手順

半導体集積回路設計の原理的な手順は図 2.16 に示すごとくである．

特に ASIC の場合，どんなシステムを集積化するかを決定することが出発点で，完全なシステムを 1 個のチップにまとめることは技術的に困難であったり，あるいは必ずしも得策でなかったりするので，システムの集積回路化に適した分割の問題も生ずる．

このようにして 1 チップ上に集積されるべきシステムが決まると，各集積回路に用いる製造技術に適した論理図を作成する．論理図が出来上がると，計算機による論理シミュレーションを行い，論理仕様を満たしたものであるか否かを調べる．

このさい個々のゲートのレベルまで分解せず，シフト・レジスタのごとき機能ブロックで回路が設計できれば，チップ上の配置，配線およびその検査に伴う問題が軽減されるので，このような機能面での階層化設計は 1 つの重要な課

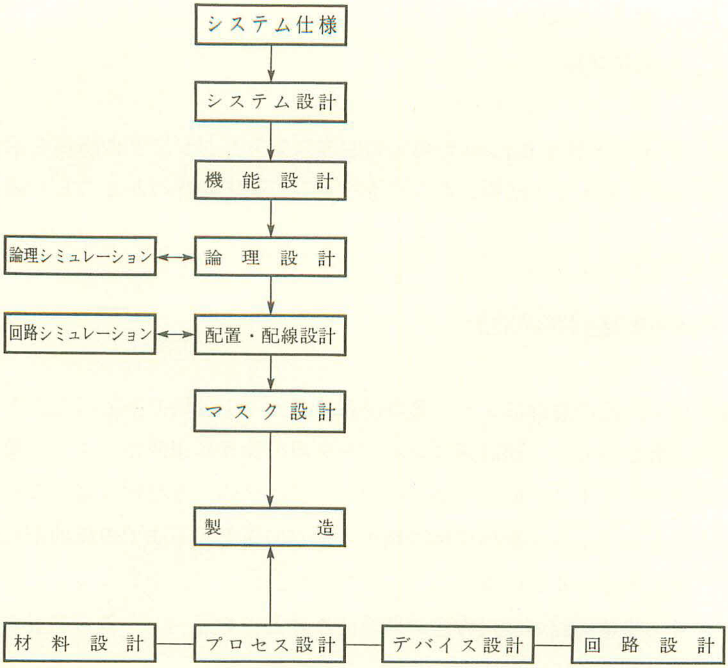


図 2.16　半導体集積回路の設計手順

題である．

つぎにこれをチップ上に配置し配線を描くレイ・アウト設計をする．そのさい論理図から各マスク層に相当する部分を図形として手書きすることは非常に手数がかかり，人為的な誤りを生じやすいので，論理図から論理回路を記号で書き，それをマスク・パターンに自動変換することが行われる．

このレイアウト設計図から集積化に伴う寄生素子も含めて等価回路を導き，回路シミュレータで回路動作を確認する．

このようにしてマスク・パターンを完成すると設計段階は終了し，製造にとりかかることになる．

ここで強調しておかねばならないことは，

(1)　半導体集積回路の機能に関する情報はマスク・パターンに集約されている．

(2)　成熟した技術の範囲内では第 1 近似として，製造プロセスはマスク・パ

ターンに依存しない．したがって各種の集積回路に対しかなり共通的な製造技術を確立できる．

(3) システム設計からマスク設計まではデバイス，基本回路としてすでに設計されているものを使用し，そのマスク・パターン化にさいし製造技術上決まっているパターンに対する幾何学的制約条件に従う限り，製造技術の詳細を知る必要はない．

(4) 製造技術上の制約条件はパターンに対する幾何学的条件として与えられ，いわゆる設計規則(design rule)といわれるものであり，設計技術と製造技術を結びつける重要な情報である．

半導体集積回路の設計，製造に関し，このような事情があることは設計と製造の分業を可能にし，ASICの普及を促進し，シリコン・ファンダリ(Silicon Foundry)を可能にしたという点で意義は大きい．

2.6.2 設計規則の例

マスク・パターンに与える幾何学的な制約をある寸法λで正規化して表現するのが，一般性も高く理解しやすい．

この基準寸法λはマスクの合せ精度，オーバー・エッチ，アンダー・エッチの特性等で決まり最悪の場合には異なったマスク・レベルのパターン・エッジ間には設計された位置から2λだけ誤差が生ずることがあることを意味する．

ここでシリコン・ゲートのnMOS技術における設計規則の例を示す[9]．

(1) 拡散層の最小幅：2λ
拡散層間の最小間隔：3λ
(空間電荷層による短絡を防ぐため)

(2) 多結晶シリコン層の最小幅：2λ
多結晶シリコン層間の最小間隔：2λ

(3) 金属配線の最小幅：3λ
金属配線間の最小間隔：3λ
(金属配線は半導体集積回路上の配線としては最上層で凹凸も多く，断線，短絡を防ぐため)

(4) 拡散層と多結晶シリコン層との最小間隔：λ

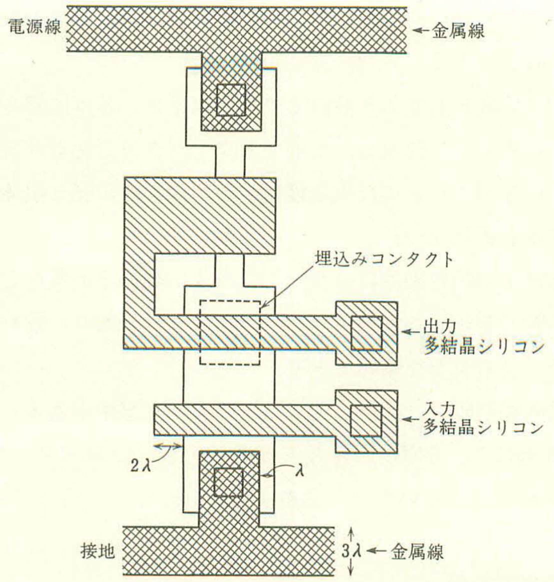


図 2.17　nMOS E/D ゲートのパターン

(重なりによる寄生容量，拡散層幅の変化を防ぐため)

拡散層，多結晶シリコン層と金属配線との間隔：λ

(5) コンタクト・ホール：2λ×2λ

(この周縁に多結晶シリコンまたは拡散層の重なり余裕 λ を要するので実際には 4λ×4λ の領域を必要とする)

(6) 各コンタクト領域間の最小間隔：2λ

(7) コンタクト・ホールとゲートとの最小間隔：2λ

(8) チャネル領域とゲートの多結晶シリコンが完全に重なるようにチャネル端からゲートは 2λ 延長させる必要がある．

(9) デプリージョン用イオン打込み領域はチャネルの周縁に 2λ 余裕をもつ必要がある．

したがって MOS 電界効果トランジスタの最小ゲート長は 2λ になり最小ゲート幅は 2λ になる．

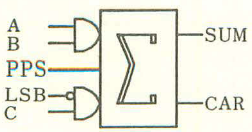
この設計規則により設計された nMOS E/D ゲートのパターンを図 2.17 に示す．

2.6.3 自 動 設 計

前記のごとく，半導体集積回路の設計に当ってはシステム仕様から出発して少なくともマスク・パターン設計まで行う，いわゆる top-down 方式による設計が不可欠で，システム仕様を高級な言語で与えたとき，マスク・パターンを出力するような自動設計を前述のようにシリコン・コンパイレーションということがある．

シリコン・コンパイレーションはいわゆる CAD すなわちコンピュータ支援設計と異なり，システム仕様を入力した後は設計者が関与することなく，マスク・パターンが得られることを目標としている．この点コンピュータ支援設計では CAD プログラムおよびコンピュータはあくまで設計者を助ける道具であって，個々のステップにおける判断が設計者に委ねられているのと異なる．

シリコン・コンパイレーションは多くの研究者が興味をもっており，種々のアルゴリズムが考えられているが，ここでは 1 例として図 2.18 に示すようなゲートつき全加算器をゲート・マトリクスで実現する場合を示す[10)]．図 2.18 の SUM とか CAR の機能はやはり図 2.18 中に定義してある．図 2.19 は機能から回路構成を得るためのプログラム MOSYN-2 の一部であるが，これから図 2.20 に示すようにトランジスタの配置，配線等に関する情報が自動的に出てくる．各記号の定義は図 2.21 に示されているが，しかしこれでは非常に読みとりにくいので，いまのプログラムにさらに MOSLAY と称するプログラムを組み合わせて回路を図に書き直すと図 2.22 に示すようになる．



＊Function SUM
C1：xor (and (A,B), PPS, and (not (LSB), C))
else C0
＊Function CAR
C1：major (and (A,B), PPS, and (not (LSB), C))
else C0

図 2.18　ゲートつき全加算器（浅田邦博助教授の提供による）

```
; **********************************************
; Variables : B  A  PPS  C  LSB
; Equivalent : ( B A )
; **********************************************
; Function   : SUM(B,A,PPS,C,LSB)
; Logic      : 00011110111000010001111000011110
; **********************************************
; Function   : CAR(B,A,PPS,C,LSB)
; Logic      : 00000001000111110000000100000001
; **********************************************
;* (4.1 + 0.9) [sec].   Fri Sep  5 09:21:02 1986
; (0) 50 FETs  8 Width  14 Chan.
; Input Order(0): B A PPS C LSB
CAR = N0
 N0 = [N22]N15 + [N13]N15 + [N20]N11 + {N22}P7 + {N20}P5
 N22 = [B]Gnd + {B}Vdd
 N15 = [N20]Gnd + [N18]Gnd + [LSB]Gnd
 N20 = [PPS]Gnd + {PPS}Vdd
 N18 = [C]Gnd + {C}Vdd
 N13 = [A]Gnd + {A}Vdd
 N11 = [N18]Gnd + [LSB]Gnd
 P7 = {N13}P8
 P8 = {N20}Vdd + {N18}P10
 P10 = {LSB}Vdd
 P5 = {N18}P6
 P6 = {LSB}Vdd
SUM = N24
 N24 = [N22]N42 + [B]N38 + {B}P32 + {N22}P28
 N42 = [N20]N48 + [PPS]N44
 N48 = [N18]Gnd + [LSB]Gnd
 N44 = [C]N45
 N45 = [N46]Gnd
 N46 = [LSB]Gnd + {LSB}Vdd
 N38 = [N13]N42 + [A]N40
 N40 = [N20]N44 + [PPS]N48
 P32 = {PPS}P36 + {N20}P34
 P36 = {N18}P37
 P37 = {LSB}Vdd
 P34 = {C}Vdd + {N46}Vdd
 P28 = {A}P32 + {N13}P30
 P30 = {PPS}P34 + {N20}P36
;
; **********************************************
;
```

図 2.19　回路図作成プログラム MOSYN-2(浅田邦博助教授の提供による)

この回路図からマスク・パターンを得るために各層ごとにわけてパターンを書くと図 2.23に示すようになる．シリコン・ファンダリというようなものが実際問題として機能するためにはこういう設計のソフトウェアが非常に重要である．

シリコン・コンパイレーションは理想的にはプロセス条件まで決定できるこ

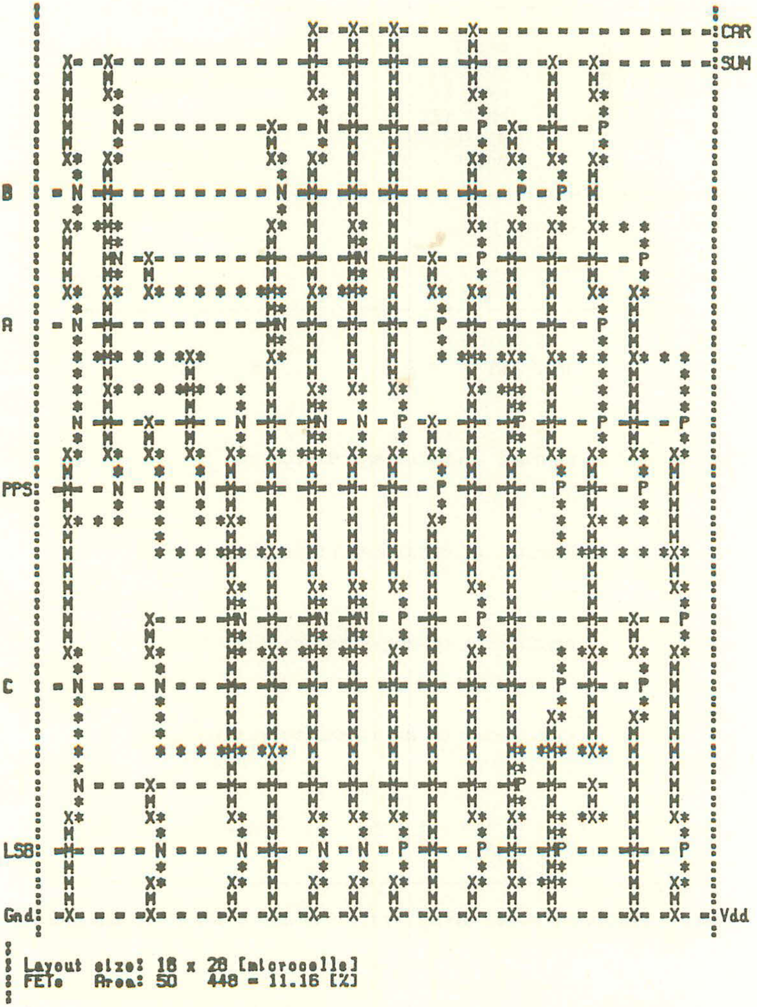


図 2.20　MOSLAY と MOSCOM により発生したゲート・マトリクス配置（浅田邦博助教授の提供による）

とであろうが，現時点ではそれの実現にはまだかなりの時間がかかると思われる．そこで実際的な解決の方法としてはプロセス条件を入力した場合，あらかじめ寸法，配置が決められているデバイスや回路の動作がどのようになるか予測する，いわゆる bottom-up 方式のプログラムが作成されている．これは原理的にはプロセス，デバイス，回路シミュレータの組合せであるが，統合シミ

```
M      .. metal
X      .. contact
N      .. nMOS FET
P      .. pMOS FET
*      .. diffusion
=      .. polysilicon
```

(a) 記号の定義

```
  *                           *
= N =     ... nMOS FET    = P =       ... pMOS FET
  *                           *

 M
*X* *     ... contact of metal and diffusion
 M

 M
=X= =     ... contact of metal and polysilicon
 M

 M
*M* *     ... cross-over of metal and diffusion
 M

 M
=M= =     ... cross-over of metal and polysilicon
 M

*    *         *
* * * * * * * * * * * *  ... angles of diffusion
```

```
*       *                   *
* *   * *   * *   * * *   * * *   ... angles of diffusion
                *     *
```

(Note: Angles of metal and polysilicon are similar to the above.)

(b) マイクロ・セルの例

図 2.21　図 2.20 の記号の定義(浅田邦博助教授の提供による)

ュレータといわれ，シリコン・コンパイレーションと組み合せて重要な役割を果たすと期待されている．

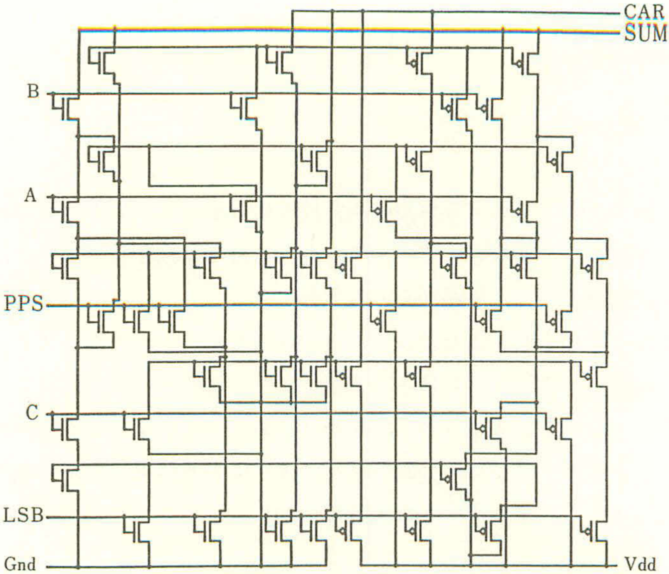


図 **2.22**　MOSLAY で描いた回路図（浅田邦博助教授の提供による）

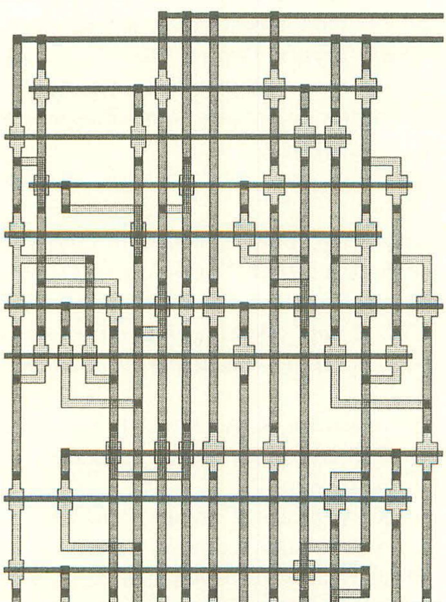


図 **2.23**　層別パターン図（浅田邦博助教授の提供による）

2.7 む　す　び

先端技術の1つである半導体集積回路技術に含まれる設計の内容は材料からはじまって，プロセス技術，デバイス技術，本稿では割愛したが回路技術，さらに配置・配線にわたる広範囲なものである．

現在までに集積されてきたこれらの技術は単なるデータ・ベースとしてだけでなく，知識ベース，さらにはエキスパート・システムに組み入れて真の自動設計に向けて技術を完成する努力が払われており，このような半導体材料，プロセス，デバイス，集積回路の設計技術の確立は半導体集積回路およびその技術の波及に大きな貢献をなすものと考えられる．

参考文献

1) L. R. Weisburg : The New DOD Initiative in Integrated Circuits : Technical Digest, International Electron Devices Meeting, 684-687, 1978.

2) T. Wada and J. Frey : Physical Basis of Short Channel MOS Devices, *IEEE Transactions on Electron Devices,* **ED-26** (4), 476-490, April 1979.

3) C. Hilsum : Band Structure Engineering, *Proc. European Semiconductor Device Research Conference,* 77-85, 1971.

4) 松下嘉明：Si 中酸素析出のシミュレーション, *Semiconductor World,* **6**(1), 82-87, 1987.

5) D. A. Antoniadis and R. W. Dutton : Models for Computer Simulation of Complete IC Fabrication Processes, *IEEE Transactions on Electron Devices,* **ED-26** (4), 490-500, April 1979.

6) H. Huppertz and W. L. Engl : Modeling of Low-Pressure Deposition of SiO_2 by Decomposition of TEOS, *IEEE Transactions on Electron Devices,* **ED-26** (4), 658-662, April 1979.

7) W. H. Lee, K. Throngnumchai, K. Asada and T. Sugano : Design Limitations of Submicron MOSFETS, Specialized for DRAM Application, submitted to the *IEEE Transactions on Electron Devices.*

8) K. Throngnumchai, K. Asada and T. Sugano : Modeling of 0.1 μm MOSFET on SOI Structure Using Monte Carlo Simulation Technique, *IEEE Transactions on Electron Devices,* **ED-33** (7), 1005-1011, July 1986.

9) J. Mavor, M. Jack and P. Denyer : *Introduction to MOSLSI Design,* Addison-Wesley, 1983 (和訳 MOSLSI 設計入門，菅野・桜井監訳，産業図書㈱，1984).

10) K. Asada and J. Mavor : A MOS Leaf-Cell Generation System from Boolean Expressions, Custom Integrated Circuits Conference, May 4-7, 1987, Portland, U. S. A.

3 新しいシステム設計

東京大学工学部産業機械工学科教授　石井　威望

3.1 は じ め に

工学部で行っているシステム設計あるいはシステム工学は，あらゆるシステムを対象とするわけではなく，大規模であり経済的に高価であるという特徴をもったある程度限定されたシステムを扱うものである．本稿ではその中でもさらに，近年実現してきている新しいシステムに重点を置いて述べる．従来の伝統的なシステム形態から，今日のシステムへの大幅な変化を生み出した原動力は，もちろん計算機技術の飛躍的発展である．将来への展望を含め，この計算機によりもたらされつつある，少し広義のシステムについて紹介する．

3.1.1 システムの設計

一般にシステムの部品点数が極端に増加してくるとシステムの設計自身を専門的に行う必要が生じる．つまり，システム技術は単なる部品技術の集合体とは質的に異なるものであり，それは，個々の部品がどれほど優れたものであってもシステムとして適切に設計されていなければ，全体としての複雑な機能を実現することがきわめて難しいということである．

特にハードウェア自身の信頼性，すなわち部品技術が必ずしも高くなかった時代には，多くの部品を使用したシステムを構築することは非常な労力を要する仕事であった．たとえばコンピュータをつくるために何万本もの真空管を集めると，必ずどこかが故障しているという事態になる．東京大学工学部におい

ても30年くらい前にTACという計算機があったが，当時の計算機の信頼性はMTBFが30～40分程度という低いものであった．したがって，それ以上大きなシステムをコンピュータでつくること，つまりそのコンピュータを5台，6台，あるいは数十台ネットワークにするということは当時はほとんど不可能であった．

コンピュータに限らず大きなシステムが正常に作動するということは，それ自身相当な技術的ノウハウを必要とするものである．今日産業的にも最も大きな影響を与えている要素の1つは，大型の計算機の技術が格段に進歩を遂げたことであり，またエレクトロニクス部品の信頼性が上がることによって各種の機械にそれらが組み込まれたいわゆるメカトロニクス製品が大量に出現したことである．

以下の議論は2つの点に焦点を絞って進める．その第1点は，システム構造それ自身に関わるものであり，計算機技術がもっている非常に大きなポテンシャルをシステム構造へどのように活かすかという本質的な問題である．つまり，従来のスタティックなシステムの構造が，よりダイナミックなものへと変化しつつあることで，特に分散化の傾向が出てきているところに1つの特徴がある．

第2点は，ある意味で技術的な余力が出てきたことに起因するものである．以前は計算機の信頼性が低く，またかつてかなり複雑な機能をもつシステムと考えられたものも，現在のレベルから見ればそれほどではない．しかしその複雑化がさらに進むと，システムの質的な性格が変わってくる．つまり，システムの動作自身よりも，むしろ人間と関わる接点，すなわちマン・マシン・インタフェースが重要な部分になる．

3.1.2　背景としての技術・産業のトレンド

システムの在り方に決定的な影響を与えたものに，エレクトロニクス部品の信頼性向上，価格の低下がある．図3.1は，メモリ価格の変動を示したものである．1970年から1990年に関する容量別のビットあたり価格であるが，まさしく指数関数的な低落である．80年からたかだか10年の間に100分の1にも降下している．これは4Kビットから1Mビットへと容量の増加を伴ったものであるが，高集積化の効果は単に価格の側面だけに留まらず，チップの小型

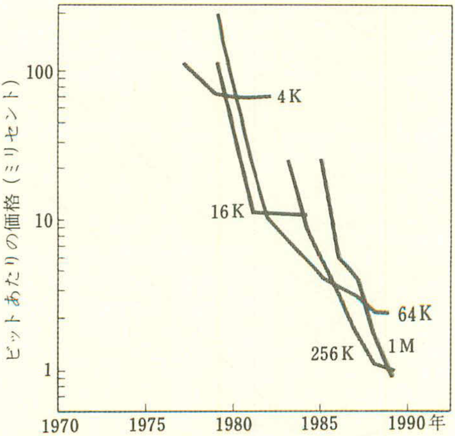


図 3.1　DRAM 価格(文献 1)より引用)

化と軽量化が進展した．また特に，回路をつくるときに部品相互間の接合部の数を減らすことができるというメリットが大きい．一般にシステムの故障のかなりの部分は，この接点部つまり要素間の繋ぎ目のところ(ジャンクション)の接続不良である．その他は電源故障，あるいは周辺からのノイズなどが原因となることが多い．そのジャンクションが集積度の上昇に従って減少するため，価格の低下と同時に信頼性が急激に上がった．

また，小型化によって次第にポータブル化，あるいはオンボード化(車載など)が起こってきている．これらは価格の急激な低下を伴う技術革新が起こったことに起因する 1 つの典型的な事象である．

図 3.2 は香港，台湾，韓国，シンガポールなど近隣諸国の場合であり，半導体の需要金額の推移を見たものである．1985 年に景気の問題等があって少し下がっているが，全体の趨勢としては近隣諸国における半導体，LSI に対する需要は急激に高まっている．台湾などの上昇率を見れば，来年はさらに上がることが予想される．円高の傾向が進めば，ますます促進されることになる．

このような高度技術の動向は日本だけを考えるのではなくて，近隣諸国も含めて考えていく必要がある．半導体の技術革新は発展途上の国々にも急激な勢いで波及している．たとえば韓国，台湾などにおいても，この図における 256 K などのかなり先端的な技術を要する製品を，試験的な段階であるにせよす

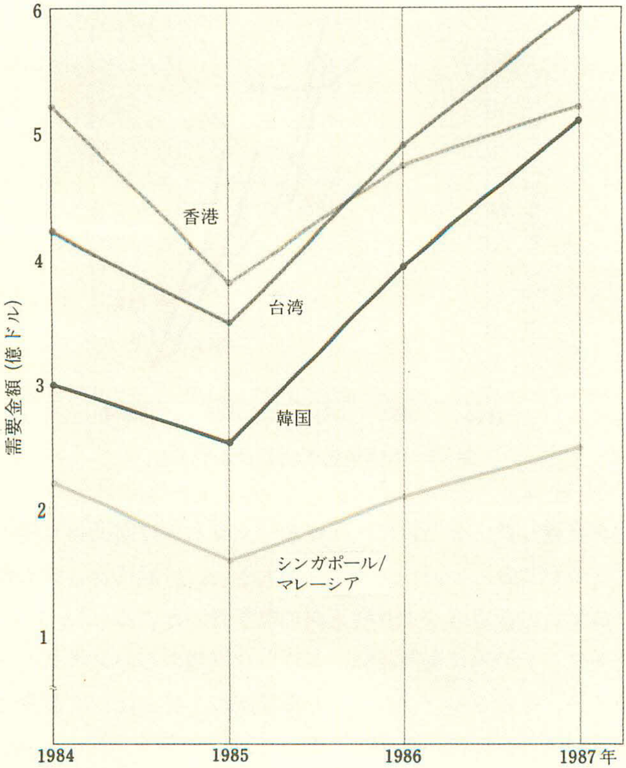


図 3.2　半導体需要(アジア)(文献 2)より引用)

でにつくれるような状況になっている．

図 3.3 はビデオテープレコーダの生産台数である．86 年の状況では韓国がすでに 300 万台の生産を達成している．これに日本の部品がどのくらい使用されているか明らかではないが，ともかくビデオテープレコーダが 300 万台，しかも来年は倍増が予想されるほどにつくられているのである．現在，台湾，韓国を含めて一般に家電製品では VTR がいちばん大きな商品である．日本では，VTR を現在 3000 万台つくっており 2 兆円の産業となっているが，近隣諸国もこのように非常に伸びてきている．日本のカラーテレビ生産台数はおそらく 1500～1600 万台くらいであるが，来年は少し減少し近隣諸国を合計した生産台数が日本を上回るという予想である．カラーテレビや VTR は，エレクトロ

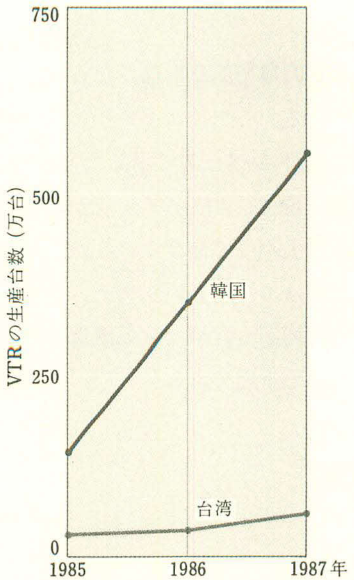


図 3.3　VTR 生産（出典：日本電子機械工業会．文献 2）より引用）

ちなみに，カラーテレビの生産はアジア NICS が日本を抜いた．

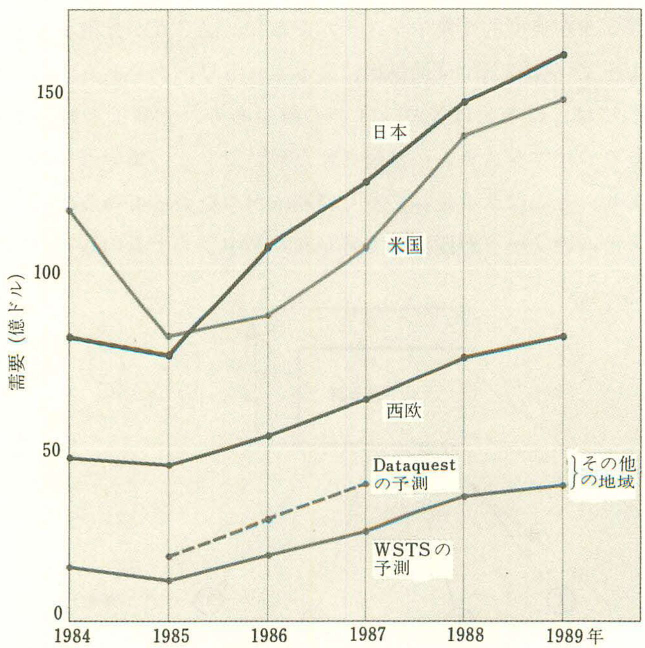


図 3.4　半導体需要（世界）（文献 2）より引用）

ニクス部品や半導体の需要の典型的な指標になるが，これらは近隣諸国において急角度で上昇してきている．

図 3.4 は半導体需要を億ドルベースで示したものである．1985 年付近でクロスして現在は日本が第 1 位で，2 位がアメリカ，そして西欧，その他の地域となっている．いずれも右上がりで伸びているが，日本の占める地位は圧倒的になってきている．したがって，新しいシステムを考える際こうした背景を考慮し，場合によっては近隣諸国も含めた産業構造の予測や将来への戦略をも併せて検討することがきわめて重要である．

3.2 システム構造の変化

3.2.1 集中から分散へ

新しいシステムのまず第 1 の特徴として，システムの構造形態の変化をとりあげる．システムの形態は，大きく「集中」と「分散」に分けて考えることができる．図 3.5 が典型的な集中システムであり，図 3.6 が分散システムである．図 3.6 のループ(曲線部分)は通信線によるネットワークをあらわしており，これは具体的には，たとえば光ファイバの線である．分散型とは，このネットワークで多くのサブシステムが接続された形態である．集中型では，中央にセンターがあり，そこにタコ足状に多くの端末がつながっている．

分散システムのノードが四角形で書かれ，集中システムの端末が円で書かれ

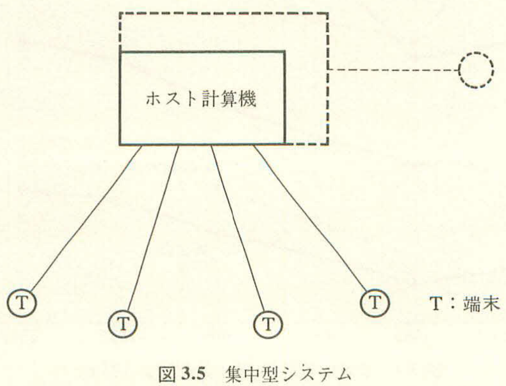


図 3.5　集中型システム

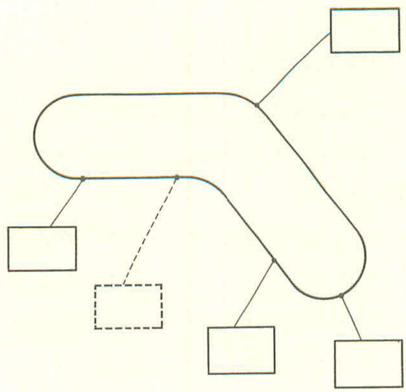


図 3.6　分散型システム

ているのは，インテリジェンスの度合を示している．つまり，知的な機能の集積をなるべく減らしたものを円で表現しており，分散システムにおける四角形はワークステーション，あるいはインテリジェントなターミナルであって，そこにローカルに使われる各種機能を分散させようということである．またネットワーク(ループ)の部分には，あまり重要な機能を存在させないというのが典型的な分散システムである．したがって，周囲のローカルな部分だけを切り離しても自律的な活動ができる．集中システムでは中央を切り離すと，端末だけではなにもできない．

破線で示されているのは拡張を検討した場合である．集中型構造では情報システムに限らずとも，つねに中央がボトルネックになる可能性がある．たとえば中央にある本体部分が処理可能容量の限界近くでつくってあると，さらに拡大することを考えた場合，中央の部分も手を加えなければならなくなる．つまり，中心部を全部交換しなければならないということが起こりうる．日本の現在の航空路の状況がその事例の 1 つである．つまり，地方空港が次第に増加してきたとき，それらから出る航空路は結局は羽田空港とすべて結ばれることになる．羽田のキャパシティ，すなわち，羽田にどれだけの飛行機が発着できるかということで全体のシステムの能力がおさえられるわけで，これは地方空港をいくらつくっても解決できない．逆に羽田を拡張してはじめて地方空港も活きることになる．

それに対して，分散システムにおける破線の意味は，それぞれの場所で個別につくったものをいつでも接続していけるということである．もちろん，ネットワークの配線部分，たとえば光ファイバのキャパシティは問題になるが，集中型に比べれば，その拡張コストは非常に小さい．また，全体のシステムが大規模になればなるほど，集中システムにおける中央の部分は膨大なものになる．その巨大化した部分を変更するには非常なコストがかかり，技術的にも難しくなる．分散型では，なし崩しにできるという基本的性格がある．つまり個々の自律性と全体の拡張性に対する柔軟さを構造の基本的性格としてもっている．

しかしながら，分散型システムにももちろん欠点はある．わが国の場合，戦後の復興過程以来，基本的に集中型のシステム形態を採用してきた．たとえば臨海工業地帯のコンビナートはまさしくこの典型であって，集中化の方向を追求したものである．集中型にするといわゆるスケール・メリット(規模の効果)が発揮され，製品の単位あたりのコストは量産によって大幅に低下させることができる．それに対し分散型では，当然それぞれの部分が重複投資ということになり不利になる可能性も出てくる．

さらにメンテナンスの難易さにおいても集中型のほうが優れている．つまり，中央に集中していればそこで一括した作業を行うことが可能であり，末端に関してはそもそも簡単なものしか置いていないから大きな問題とはならない．ところが分散型の場合はいろいろな場所にかなり複雑な設備があるわけで，メンテナンスはそれぞれ個別に行う必要がある．

集中と分散の定性的な特徴としてはさらに，集中型では可能な限りの標準化を行って画一化を進めたほうがスケール・メリットを有効に利用することができる．したがって，システムとして一般的に平均化の方向が求められる．それに対し，分散型の特色はむしろ個々のローカルな独自性にあるわけであり，さまざまな種類の要素が混在する中で働くシステムといった性格を潜在的にもっている．集中と分散の概論として，こうした一般的な特徴をまずあげることができる．

ところで，これまで現実的なシステムとして分散システムをつくれなかった１つの理由は，前述の半導体等に見られるデバイス関係の制約が厳しかったことである．つまり非常に高価なコンピュータ，あるいは電子機器を大量に使用

して，重複投資となるようなことはコスト的にまず困難であった．あるいは信頼性が低いため，たとえば遠隔地において使用することを考えた場合，それぞれのメンテナンスの要求が頻繁であると，人件費，輸送費の点で明らかに不利である．しかし，それが近年の傾向に見られる価格の低下，信頼性の向上，小型化が進展し，軽薄短小な部品が豊富に供給されるようになると，これまでの制約がなくなるわけである．

3.2.2 コンピュータ・ネットワーク

分散システムのハードウェアにおける特徴の1つは，それぞれのサブシステムを結合しているコンピュータのネットワークである．図3.7はすでに商業ベースで普及しつつあるイーサネットと呼ばれる典型的なコンピュータ・ネットワークであり，ネットワークの実体は同軸ケーブル，あるいは光ファイバなどであるが，ネットワークの規模からローカル・エリア・ネットワーク(LAN)と一般に呼ばれているものである．

東京大学の工学部においてもイーサネットの設置を現在行っているところである．これは光ファイバのLANであり，構内の多くの建物に設置されたさまざまなコンピュータが結合される予定である．コンピュータは全部同じ形式のものを接続しておけばシステムとしてはいちばん簡単であるが，前述のように分散型のもつポテンシャルは，むしろローカルな非常に多様性に富むものを存分に活用していくということであるから，いろいろな形式のコンピュータがつながっているほど本来の姿である．しかしながら，当然その場合異種のものがシステムに混在することによる技術的問題が生じてくる．つまり，相互のコミュニケーションを行うさいのプロトコル(通信規約)の問題などである．要するにそれぞれのコンピュータで日本語と英語のように言葉が異なる場合にどうしたらよいかということである．

集中システムであると中央集権的に管理するため，本質的にはじめから統一的に拘束しておりそうした問題は生じない．逆に1つの端末から隣の端末に連絡しようとすると直接そのようなことはできず，全部一度中央まで行ってまた端末に返ってくる形になる．それはあたかも九州の各県の知事さんが集まって会議をするさいに，最も早く集まるためには，東京あるいは大阪に集まるのが

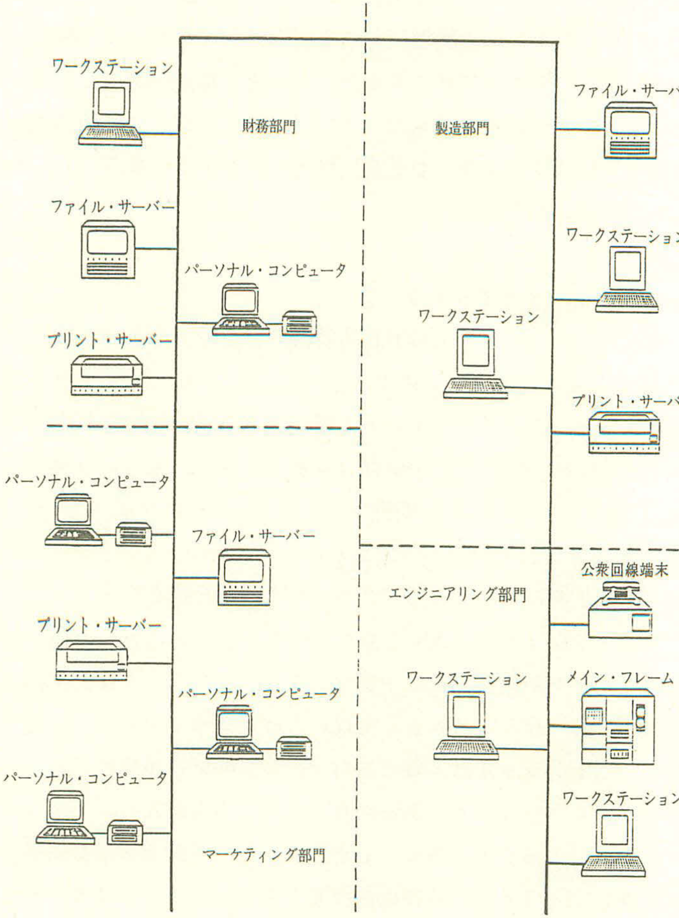


図 3.7　ローカル・エリア・ネットワーク（イーサネット，文献 3）より引用，Intel Corporation の好意による）

よいということと似ている．もし仮に九州の中を自動車で，いわんや鉄道を用いて，たとえば鹿児島県に集まろうとすると大変なことだといわれている．そこでそのような場合には，集中したセンターに一度集まってきて，そこを経由してからいろいろな活動をはじめることになり，これが集中システムのポイントになるわけである．

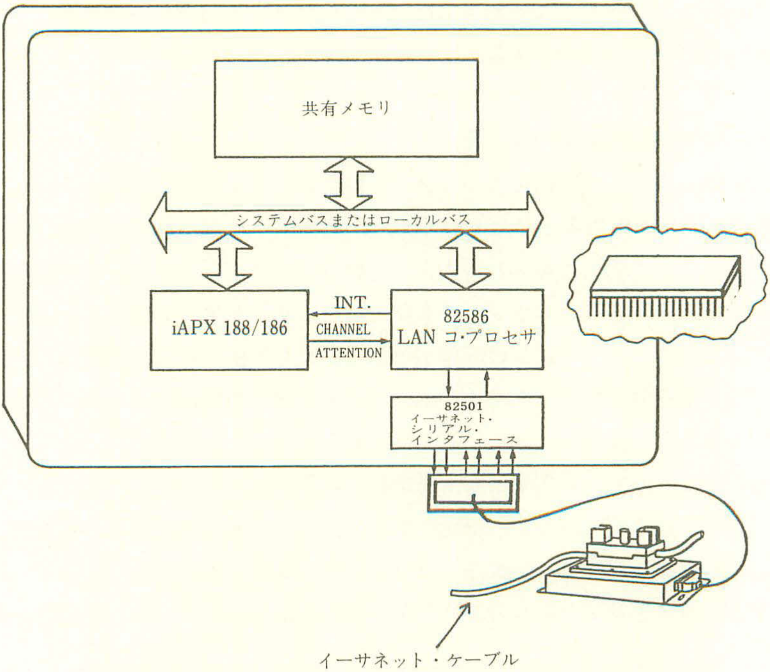


図 3.8　イーサネット・コントローラ (文献 3) より引用, Intel Corporation の好意による)

これに対し分散システムの場合は，分権しているため直接横同士で互いのやりとりをすることになる．たとえばコンピュータ A からコンピュータ B に何かメッセージを送りたいというときには，行き先の情報をタグしたパケット (小さなユニット) をつくり，それを相互に送受信するということを行う．分散型では直接に互いのネットワークをつくれる可能性をもっているわけである．このためにはもちろんハードウェアの信頼性，あるいは個々のシステム上の整合性がなければならないわけで，具体的には工夫を要するものである．

図 3.8 は，イーサネットとそれぞれのコンピュータをつなぐユニットを示している．イーサネット・ケーブルには，このような 1 チップ化された専用のインタフェース回路が多数とりつけられ，その先にさまざまなコンピュータが結合されるわけである．イーサネットのプロトコルの比較的低いレベルの処理手順は，すべてこのコントローラ LSI にハード的に集積されている．このよう

な集積度の高いデバイスがあってはじめてシステムとして分散が可能になり，実際に商用化できるのである．

3.2.3 ロボットにおける分散

集中から分散への傾向は機械制御の立場においても論ずることができる．図3.9はロボットの例を示したものである．集中型のロボットの場合は，ロボット本体とは全く別に設置された大きな制御器の中にまさしく集中的に制御用のコンピュータがある．ロボットの本体にはセンサーとアクチュエータがあるだけで，制御器からタコ足状の配線がこれらに対して出ていっている．たとえば手の指の先についているタッチ・センサーからの信号線が，この中央の制御器のところまで直接入ってきているわけである．

線の集まりの太さが次第に太く書かれているが，これは実際に太くなっている．先端では1本であるが，根元に来るに従って次第に増加する．制御器から指示する場合も同様で，制御器の出力はすべて操作対象に直接つながっている．情報とは本来重量がないものであるが，実際にはこの例のとおり配線自身の重

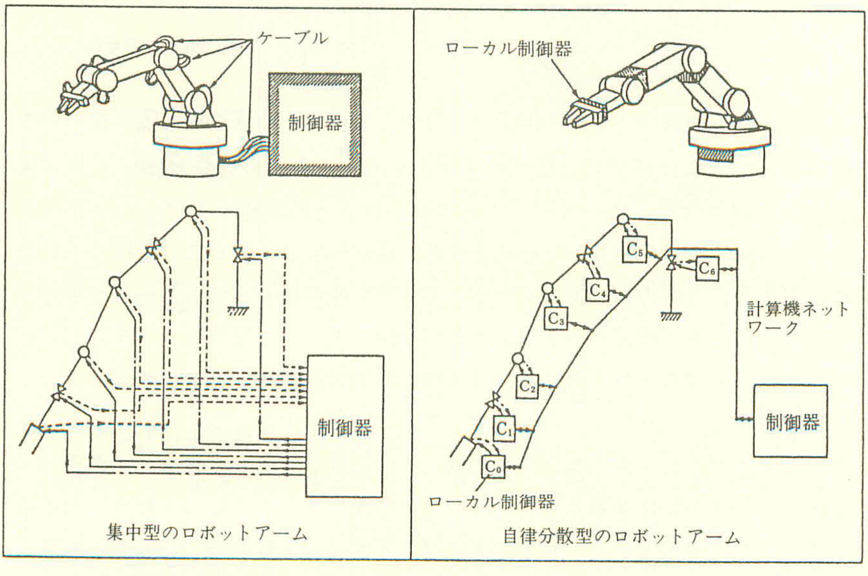


図 3.9 自律分散型マニプレータの概念図

量や体積は相当なものとなってくる．高度なロボットにするために大量のセンサーを使用したり，多くの自由度を駆動するためにアクチュエータが増加するに従って，根元付近が膨大なものとなってしまう．

これはロボットのような機械に限ったことではなく，プラントのコントロール，あるいはビルのエアコンなどのコントロールを集中型で行うときには全く同様で，中央制御装置の直前の根元となる部分では，配線やパイプが巨大なものとなってしまう．これに対し分散型では，制御器は中央だけではなくローカル制御器として小さく分散された形で組み込まれている．これも1チップの非常に小型なマイコンが使用可能となり，しかも安価になったからできたわけである．こうした形態では通信線は根元も先も同じであるため，長くなっても複雑さを増すことなく延ばしていくことができるが，集中型は先に行けば行くほど大変になる．

さらに集中型は何かトラブルが起こったとき，たとえば根元の制御器が故障するともちろんすべて使えなくなる．一部の故障が全体へ及ぼす影響という点では分散型の場合はより柔軟である．たとえば人間は肘の関節が故障したときでも，肘を曲げないでほかの関節で補いながら作業をすることができる．つまり他の部分を利用した補償動作が可能である．このような意味でシステムの全体としての信頼性を高めているわけである．そうしたことを実現するためには，もちろんシステムのソフトウェアの部分は複雑になる．しかしながら適当に順次拡張しさえすれば，ハードウェアはあまり変えることなくソフト的にリライアビリティを高めることが可能である．

技術的な変遷という意味では，最初に集中型のロボット，あるいは制御の形式が実用化し，それから分散型に向かってきたのが実際のプロセスである．われわれの研究室でもこのような分散型のロボットで実験を行っているが，各関節に少なくとも1個ずつチップをもっているから，1本の腕に6個も7個もマイコンがある．そこで問題となるのがそれらのマイコン相互の通信である．前述のイーサネットをさらに小型化したものをロボットの中につくることになるわけであるが，その場合ソフトウェアが問題になってくる．

ここで分散システムのソフトウェアに関して，集中型のそれに対する特徴をあげることができる．それはシステムの空間構造に由来するものである．ロボ

ットでは，たとえば関節が動くときに他の関節に対して，自分の動作を予告したり，自分のデータがどうなっているかといった通信を行っている．交通システムなどにおいても同様であるが，このような力学系ではある運動に対して最も近い部分がいちばん影響を受ける．したがって，自分に近い部分に最も多くのデータを送信すればよい．つまり，このような分散型では通信が分布する範囲は空間的な相互関係に基づいて決定されている．集中型の場合にどの範囲に通信するかということは，全部中央の制御器で管理するわけであるが，この場合一般にすべての要素は対等に扱われている．したがって集中システムではある意味でたいへん贅沢なことをしていることになる．これに対して，分散型ではシステムの形態が自然にそうした冗長性を削っている．別のいい方をすれば，分散型においては空間の構造がビルトインされたような形でシステムがつくられているわけである．

3.2.4　交通システムにおける分散

交通システムの設計においても分散システムのこうした特徴が利用されはじめている．以前，多数の電動自動車をコンピュータで制御する新しい都市交通システムの研究開発が行われたことがあった．当時の技術水準では，非常に多数の車のコントロールは集中型のコンピュータでなければ不可能で，車上には簡単な通信機器を搭載して制御情報を通信していた．その場合，実際に走行中の車の関係を考えると，明らかに相前後する車しか衝突する危険がないわけである．つまり，物理的に 100 台も前の車がこの車とぶつかる可能性は皆無である．ところがソフトウェアの上ではこれらはすべて同等の可能性として扱われている．したがって，あらゆる前後関係の情報が過剰に使われていることになり，逆にその過剰な自由度を減らすプログラムを新たに用意する必要さえ出てくる．それに対して分散型の形態では，車上にそれぞれオンボードのマイコンなどをもっており，この場合，前の車との車間距離だけを問題とすればよいわけである．そのような物理的な空間の情報を利用した形でシステム構成を設計することができる．

図 3.10 は最近の地下鉄の交通管制システムである．現在次第に普及しているのは集中システムではなく，各駅にサブシステムを置き，全体を光ファイバ

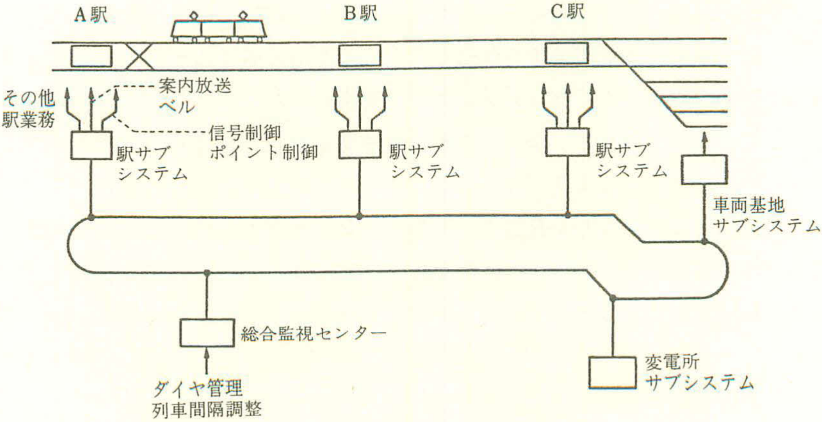


図 3.10 交通管理システム（文献4）より引用）
分散型鉄道トータルシステム．駅サブシステムの１つが故障しても局所的な業務は可能である．

や同軸ケーブル，将来は人工衛星などを使った無線でつなぐ分散システムである．この通信ネットワークは各駅間の情報交換の媒体となるとともに，もちろん，いわゆる全体としての状況をすべての構成メンバーに伝える機能をもっている．たとえばいま電車が駅を出たというような局所的情報を伝えているかも知れないが，これらはすぐ隣の駅に最も多く伝達される．さらに，個々の駅でローカルに発生しローカルに処理できることを除いた全体に関係する情報は，これを通じてどのメンバーも知ることができるわけである．その全体情報の管制をしているのが総合管制，あるいはモニターのシステムである．

こうしたシステムではたとえこのネットワークが切れても，その間だけ徐行運転をするということが可能である．あるいは念のために間引き運転にして速度を落して走るなどすれば，とにかく全部止まることだけは避けることができる．こうしたことも集中システムではとてもできないことである．

実用上でさらにメリットがあるのは，このネットワークが一度に全部開通するのではなくて，一部しか開通していないというときでもはじめはその中だけで運用することが可能なことである．そして駅をメンテナンスするときに順次拡張工事を行ってつないでいくことができる．前述のように，集中システムを拡張するときには，全部一挙に変えなければならない．新幹線などでも丸一日

運行を停止して作業をするということがあるが，分散型では少人数のメンテナンス・グループなどが1つ1つ改造していくことが可能である．あるいは，むしろはじめからそのようなシステムとして計画しておくことで，コスト的にも非常に安くなるのである．全体が実働状態でありながら部分的にそのようなメタボリズムを並行して実施することができる．

さらにいえば，そうした改造を少人数でつぎつぎとやっていくと，駅の数が10もあれば，10回目に至っては作業能率は非常に上がっている．1回しかやらなければ習熟効果はゼロである．そうしたメリットもかなり出てくるわけである．

3.2.5 ホロンとバイオシステム

前項でシステムの全体について触れたが，この“全体”を意味する言葉として holos という表現がある．これに対してローカルな粒子のことを on という．ホロスとオンという対立する概念が集中と分散に関する議論の背景として出てくる．その両方を一緒に考える立場として，Arthur Koestler(アーサー・ケストラー)が1967年の *The Ghost in the Machine* という本の中でつくった言葉がホロンである(図3.11)．新しいシステム設計の1つのコンセプトとしてこのホロン的な立場がある．

ケストラーらがホロン的な構造の典型例として示しているのが，人体を含めた生物体におけるシステムの構成である(図3.12)．それは分子からはじまり細胞内小器官(オルガネラ)がつくられ，そのオルガネラが集まって細胞になり，器官になり，個体になり，さらに社会を形成するというハイアラーキ構造である．ただしこれはハイアラーキといっても一般的な集中型のハイアラーキとは少し異なり，ぞれぞれの階層はかなり自律している．たとえば細胞のところで切り出してみると，細胞だけでもある意味の自律性をもっている．しかしながら一方では全体のルールにも支配されている．その支配が正常に作用せず統制がとれなくなると癌細胞のようになることもある．癌は，細胞としては確かに活動しており生きているが，異常にそれだけが増殖しすぎたものであり，それが原因で全体としてのバランスを失って個体自身が死んでしまうということも起こる．故にそのバランスを保つしくみがあるわけだが，その一方では個々の

(HOLON) = (HOLOS) + (−ON)

HOLOS：ギリシア語で全体の意.

−ON：粒子を表わす接尾辞.

by Arthur Koestler (1967)

図 **3.11**　ホロン

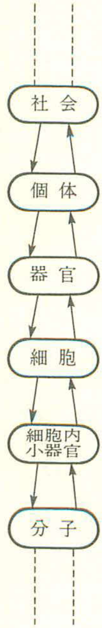


図 **3.12**　生物体の構造

部分はかなり自律しているのである.

ところで，このハイアラーキの中でどの辺からが生命(生物)現象と見なされているかということであるが，分子のレベルは完全に死んでいるが，それはオルガネラの辺りからであろうといわれている．新しいシステムを考える上で最も興味あるシステムの1つはこのバイオシステムである．生物的(生命的)なビヘービアをするシステムの本質は何であるのか．蛋白質などといった物質としての側面ではなく，システムの側面から見て，これは生きものだと感じさせる生命的な動きの本質は何であろうかということが，最近境界領域的な分野として盛んに興味をもたれている．そうしたものが出てくるのが，おそらくこの細胞内小器官からである.

たとえば自己形成，つまり自分自身が無秩序の中から，あるいは多くのアミノ酸の溶液の中から，ある特別な構造をしたものが形成されてくる(形態の発生)といえるのがこのオルガネラの辺りである．これより下はいわゆる物理法則(エントロピー増大の法則)に従って秩序がどんどん崩壊していくのが普通で

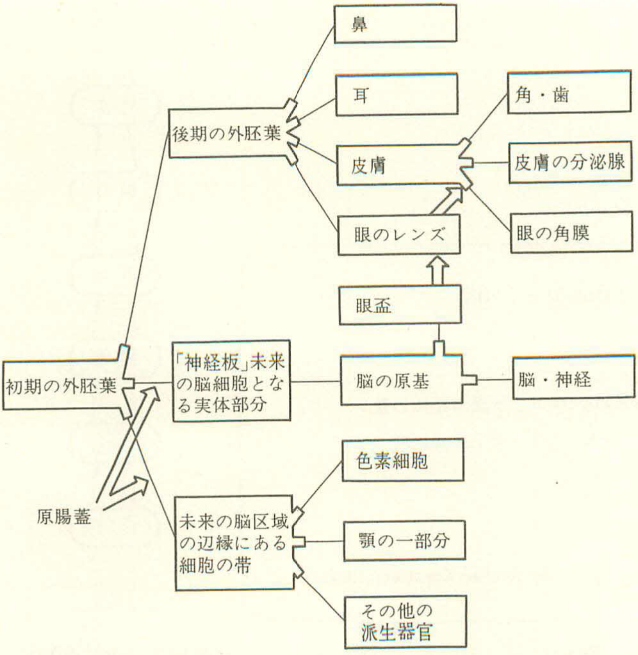


図 3.13　形態発生過程の例(R. M. Clayton による)
両生類胚の初期外胚葉がたどりうる行路の一部分を図示したもの．多数の誘導関係のうちで3組のみを矢印で示した．

ある．もちろん無機的な結晶のように擬似的に秩序ができる現象もあるが，その場合にはたとえばエネルギーが最小の状態になっていくという熱力学的な物理化学法則が働いている．ところが，細胞内小器官から上は通常のエネルギー的な原理ではなくて，明らかに情報的な原理，つまりDNAによる非常に選択的な秩序形成や複製が起こり，自己増殖が進められていく．

図3.13は形態発生過程の1例である．最初の最も単純な受精卵がつぎつぎと卵割して，特別な神経や脳，目の角膜などいろいろなものへと分化していく．それがどうして起こるのかというメカニズムは，生物的なビヘービアの中でも最も未知なことの1つであり，自然が提示している学問的にも最も興味のあるシステムである．こうしたものを人間が工学的なシステムとして設計することはまだ非常に困難であるが，高度なシステムの1つの模範として現在盛んにその原理が研究されている．

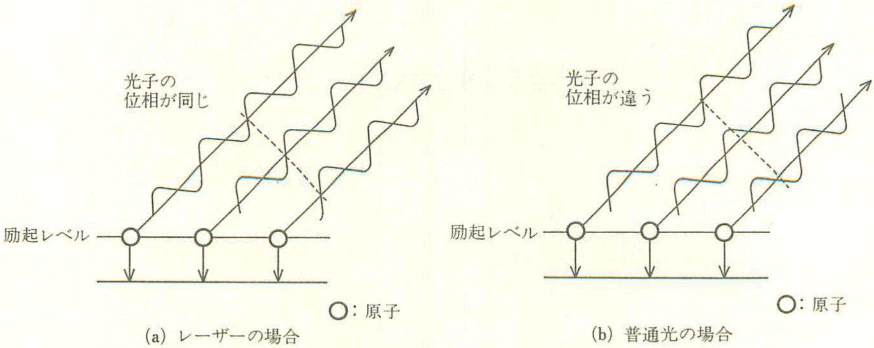


図 3.14 レーザーと普通光の波の位相

3.2.6 システムの秩序化

生物における秩序形成は非常に複雑な過程であるが，これよりもっと簡単な例でシステムの秩序化を考えてみることもできる．図 3.14 はレーザー光と通常の光とを比較したものである．通常の光源から放出される光は光子の位相がそれぞれ異なるが，レーザーの場合にはすべての位相が揃うような発振をしている．高いレベルのエネルギー状態から低いレベルになるときに光が放出されるわけであるが，そのときにレーザーでは位相が揃った光が出る．つまり位相が揃わない普通の光に比べると秩序が高い状態で出るのが特徴である．物理現象においてはわれわれはこうしたシステムをつくることができる．あるいはこれはまだシステムとはいえないかも知れないが，一種のメカニズムとして秩序が高いものを人類がつくり出している例であり，こうしたところから学ぶべきさまざまなことがある．

それはたとえば，発振波長の決定メカニズムの中に生命的な現象と類似した面をもつことがあげられる．つまり，おのおのの光子の波長には不確定なゆらぎがあり，そのゆらぎがあるレベルを越えたときに，それがドミナントなオーダリング・パラメタになって，そこにすべての光子が従うようになる．そうした状況に次第に落ち込んで，ある波長に収束するわけであるがそのプロセスは非常に興味深いものであり，生物における引き込み現象と類似したところがある．これは双方とも一種の秩序が形成されていくプロセスであって，ランダム

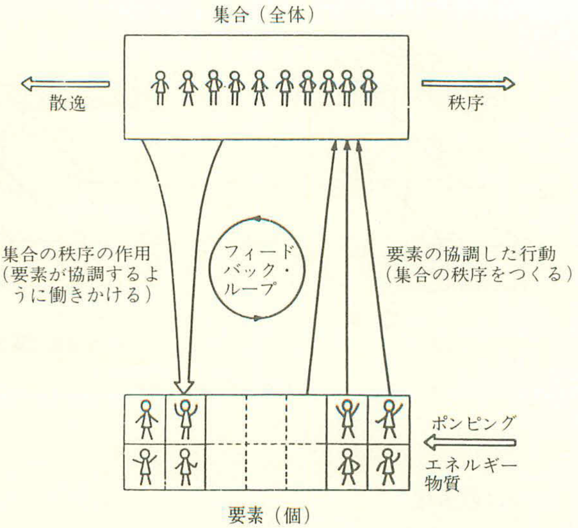


図 3.15　ホロニック・ループによる秩序化（清水博教授による）

でエントロピーが高い状態からある種の秩序化へ向かっていくのだが，それがどのような条件でまたどのようなメカニズムで伝わっていくかが問題である．特に個々の部分にゆらぎがあるというのが非常に重要なことである．分散の場合も先ほどローカルの特殊性，自律性といったが，ゆらぎあるいは遊びといってもよいかも知れないが，そのようなものを許した，あるいはそれを十分に活用したシステムであるといえる．これは，適応性，柔軟性のあるやわらかいシステムであるというい方もできる．

図 3.15 は東京大学薬学部の清水博教授によるものである．これも新しいシステムを考えるときに個と全体を意識した非常に示唆に富む仮説である．ポンピング・エネルギーと書いてあるところに外部からエネルギーが入ってくる．これにより，そこにあるさまざまな個性をもったパーティクルの集団が協調した行動を起こし，たとえばコヒーレントになる，あるいは秩序ができてくるとこんどは逆にそれが全体に働きかけるというフィードバック・ループができる．ハーケン（レーザーの数学的なモデルを提示した学者）は，サーキュラ・コーザルティという言葉でこのループを呼んでいるが，清水教授はホロニック・ループという言葉を使っている．

このループができると秩序が形成される．発振波長がどのくらいになるか，あるいはオーダリング・パラメタが何で決まるのかは，たとえばレーザーの場合では両面にある反射鏡の位置，間隔によって非常に影響を受ける．しかしながら一方では波長のゆらぎがあり、はじめはこれらの自由な競合状態になっていて，その中でドミナントになったものが次第に成長し，このループを繰り返す間に秩序になっていくというプロセスが1つのモデルとして考えられたわけである．もちろんこのプロセスがうまく働かない場合には，流入したエネルギーは秩序化されることなく，次第に散逸してしまうという可能性も存在する．

3.2.7 システムのソフトウェア

ここでは実際のシステムの論理的な振舞いを記述しているソフトウェアそれ自身について述べる．ソフトウェアはシステムの中でも最も論理的に抽象化されたものであって，フィジカルな部分が捨象されたものである．最近のシステムは先ほどの分散システムでも同様であるが，ソフトウェアのウェイトが次第に高くなっている．量的に多くなっているだけではなくて，時間的なプロセスも変化してきている．

図3.16は一般的な工学的システムにおけるソフトウェアのライフサイクルを示したものである．おのおののフェイズにおける作業量の時間的推移を縦軸の所要工程でとっている．まず最初にシステムのパフォーマンスあるいはシステムへの要求を定義する部分があるが，これも広い意味でソフトウェア・ワー

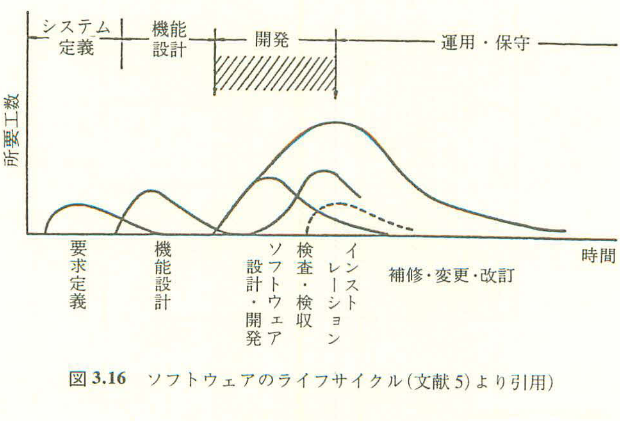


図3.16　ソフトウェアのライフサイクル（文献5）より引用）

クであり，場合によってはシミュレーションなどを行うものである．つぎに機能設計である程度の工数が必要となるが，ピークとなるのはもちろん開発の本番に入ってからである．つまり，実際のソフトウェアの設計開発である．そしてそれらが正しくつくられているかどうかを検査しながら，部分的に制作したものを組み合わせて次第に大きくしていく．これが具体化され，全体に対する検査が終わると本格的運用に入る．

運用に入ってからは急速に工数が減っているように書いてあるが，実際は必ずしもこのように減るとは限らない．つまり運用が開始されても改訂や改修，あるいは改良などを積極的につぎつぎと行っていく．したがって，10年くらい経てもまだそのソフトウェアのメンテナンスをときどき行っているというようなことが起こる．しかしながらそのこと自身は出来上がったものが不完全だったと解釈するのではなく，逆に将来複雑になり大きなシステムになればなるほど，この部分が非常に重要なものとなってくる．つまり，使用しながらでも変更していけるということがソフトウェアのもっているシステムのフレキシビリティそのものであるから，その点をリジッドに押さえてしまってはソフトウェア固有の利点を生かせなくなるわけである．

ところがこのメンテナンス作業は，実際はかなり大変な仕事である．デバッギングがメンテナンスの中で最もコストがかかることであり，これは改善の一種であるかも知れないが，それを運用時に行うのはなかなか大変である．したがって，ソフトウェアのシステム設計の時点から保守・運用の段階を十分考慮

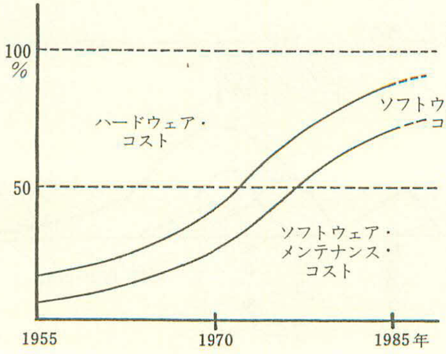


図 3.17　計算機コストの内訳

しておくことが実際は非常に重要である．そうしたことがシステム全体の経済的な問題を決定することになる場合もある．

図 3.17 は，計算機のハードウェア・コストとソフトウェア・コストの予測である．ソフトウェアにはメンテナンスのコストと開発のコストがあるが，特にメンテナンスのコストが急速に上がってきている．この図でたとえば 1985 年で見るとハードウェア・コストは 10％のオーダーである．しかもソフトウェアの開発にかかるコストもこの程度であって，残りの 7，8 割はソフトウェアのメンテナンス・コストになっている．傾向としてこの方向は今後とも続くであろうと思われるため，こうした点を無視したシステム設計は将来は現実には考えにくいということである．

3.2.8 CCV 化

図 3.18 は CCV (Control Configured Vehicle) と呼ばれているもので，制御優先的な機械である．通常の航空機は本来フィジカルに安定性をビルトインしたシステムとして設計されている．しかしながら逆にいえば，これはある意味で安定性自身が拘束になっていて，その物理法則をはずして自由なことはできない．それならば，何故そのような本質的に安定な構造としたのかといえば，もちろんそれは飛行中に制御が不安定になった場合に回復できずに墜落してしまう可能性がきわめて高いからである．したがって，とにかく前提として物理的に安定な設計としているわけで，その上に立って宙返りなどのさまざまな複雑な運動をすることを考えている．

ところがこの考え方が最近少し変わってきている．つまり，この自衛隊の国産実験機の場合は必ずしも完全なものではないかも知れないが，本来物理的に不安定な系であっても計算機のコントロールで動的な安定をつねにつくり出すことができればよいというわけである．もちろんそのためには，計算機の制御システムの信頼性が十分に高い必要があり，そうでなければこれは非常に危険である．したがって従来はこのようなことはとても考えられなかったわけである．CCV の機体は空力的には本質的に不安定な系となっており，つねに制御システムによって過渡的な安定をつくり出している．

さらにこうしたシステムの特徴として内部の通信系統などがきわめて分散的



図 3.18　国産 CCV 機(T-2)

になっていることもあげられる．これは信頼性向上が目的であり，光ファイバによる通信を何重にも冗長化して行う構造となっている．

いずれにせよ高い信頼性のある制御システムが可能となってくると，擬似的に自然の法則を自らの制御系の中にビルトインすることができる．これによって従来は不可能であったこと，たとえば横滑りして飛行機が横方向に運動するというようなことができるようになった．もともと人間の 2 足歩行や，生物が行っているかなりの動作をバイオメカニックに解析すると，相当な部分が不安定であることがわかる．4 本の足で走っているように見える動物でさえも，瞬間的に見るとたいてい 2，3 本で動いている．4 本全部使っているのは非常に少ないようである．極端にいえばつねに不安定であるわけで，よろめきながら歩いている．よろめくということはある意味で重心移動や重力の作用をうまく使っていることである．その結果驚くほど少ないエネルギーで，しかし制御面ではふんだんに情報を使うことでそうした動作を実現している．つまり，制御に自信があるとよろめくのを利用してうまくタイミングをとって足を出していけばよい．また，情報的にトレーニングを積めば一輪車のような不安定なものでも学習効果で乗れるようになる．

このように生物が行っていることは，この CCV で実現しようとしていることにかなり近い原理を使っている．つまり自然の物理的拘束(安定化)条件をはずして自由度を高め，その部分を十分な信頼性のある制御で裏づけをして動的に安全性などをしっかりと確保していく．おそらくこの方向の技術が新しいシステム設計の中で今後ますます鮮明に出てくるのではないか．それが計算機技術がもたらした最も優れた 1 つのシステム形態である．これは直接分散とは関

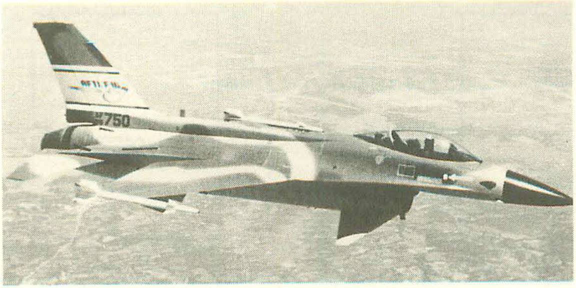


図 3.19　アメリカの CCV 機(F-16)

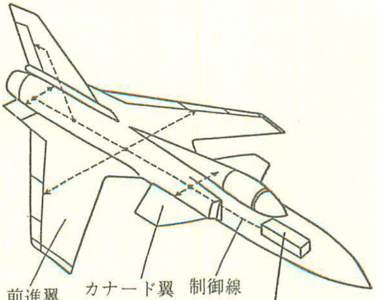


図 3.20　アメリカの CCV 機(X-29)

係ないかも知れないが，しかし少なくとも，集中システムは本質的にリジッドなシステムであり，拘束がきわめて強い．この意味では従来の飛行機の設計と共通している．分散システムではそれがルーズになって，個々の部分が自律的になってくる．しかしながら一方においては，おのおのがばらばらになってしまう危険性も出てくる．その間のバランスをうまくとっているという意味では，分散システムの指導原理はこの CCV の原理に近いといえる．

図 3.19，図 3.20 はアメリカで開発している CCV である．機首の部分に，フライト・コントロール・コンピュータがある．カナード翼，前進翼など，新しい形態をとり入れ，これらの不安定性を利用して実験しているようである．

図 3.21 は CCV の設計の概念を示したものである．CCV に限らず，従来の設計の流れは将来非常に変わっていくことが考えられる．基本設計としては，従来は構造設計，空力設計，原動機設計など，まず第一に飛行機が安全に飛ぶ

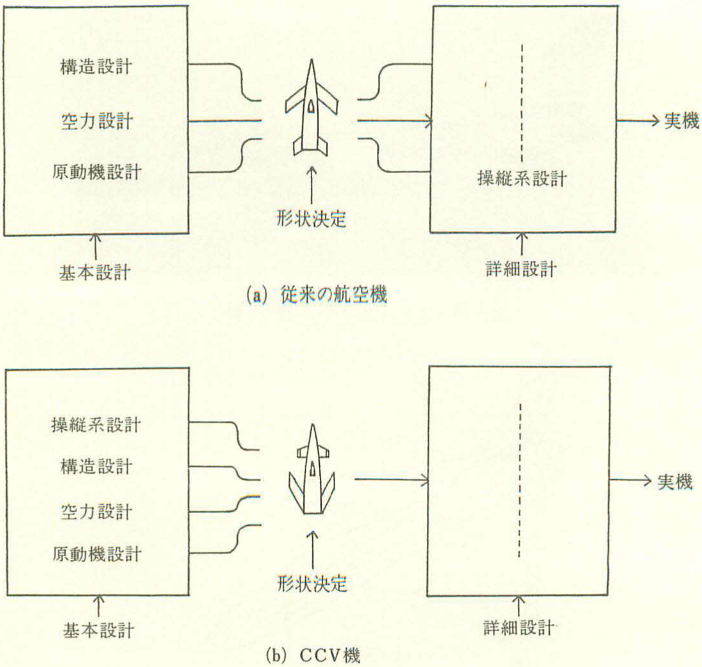


図 3.21　CCV 航空機の概念

ための要素がはじめにできて，その後で操縦系統の設計などの詳細設計が付加されてくる．これが従来の典型的な例であるが，これはある意味では自然の空気力学的な法則の制限を最初から受けてしまうということである．ところがCCV 設計の考え方では，いわば最後にあった操縦系統がはじめから入ってくる．したがって，他の重要な部分と全く同時にあるいは時には先行して操縦系統の設計がはじまるわけである．

このような設計方法で本当に飛行機をつくることが可能であるかどうか．それは先ほど，実際に信頼性の高い制御システムを実現できるという自信があってはじめて，このような形態が可能になると述べた．しかしながら，いまその材料は揃ったとしてもその設計自身は非常に複雑なものである．従来は各部を分けてしまっているから，設計自身は分散的に行うことになる．つまりなし崩しに進めることが可能であったが，CCV の設計では全部を同時に一挙に行わ

なければならない．つまり操縦系統のフレキシビリティをできるだけ高め，運動性能をきわめて高いものとする．そのために空力設計では基本的には不安定な形態とし，それは制御で確実にカバーするということを最初からやってしまう．それから詳細設計に入るというわけで，従来の設計より開始時点の負荷が大きく，また設計における計算機の役割が決定的に大きくなっている．

3.3　ヒューマン・インタフェースの設計

3.3.1　機器設計の考え方

新しいシステムを考える上で第2の論点となるのが人間と機械の接点の問題である．機器の設計の考え方は歴史的にかなり変化してきている．昔は先ほどの飛行機の例と同様にまず最初にハードウェアのデザインをしていた．そしてそのハードに見合ったソフトウェアをつくって，フレキシビリティや複雑な機能などを付加していく．その後で，こんどはそれを使うときに使いやすいようなインタフェースを考えるという手順が普通であった．

ところが計算機の容量が大きくなってくると，先ほど述べたようにこんどはソフトウェアの部分が非常に大きなウェイトをもつようになる．コスト的にはこの部分の比重がきわめて大きくなっている．したがって，ソフトウェアをあとからつくるのでは効率が悪くなり，最初にソフトウェアを考えてからハードウェアの実現を図ることになる．システムの設計においてソフトウェアが先行することになり，順序が逆転するわけである．ところがまだヒューマン・インタフェースは最後に行われている．

それがさらに進むと，おそらく結局はヒューマン・インタフェースの設計が，最初に来ることになるであろう．というのは，近年大きなシステムの障害が人間の操作などのミスがもとで起こるということが多く，しかもそれが非常に重大な事故につながる場合があるからである．したがってシステム設計をするさいに，まず人間によくわかるシステム，人間が使いやすいシステムとすることからはじめ，それに見合ったソフトウェアをつくり，それからハードウェア・デザインへ進む．逆にいえば，ハードウェアの性能に相当余裕があり，確実に動く自信が与えられた段階ではじめてこれが可能となる．以前の技術レベルで

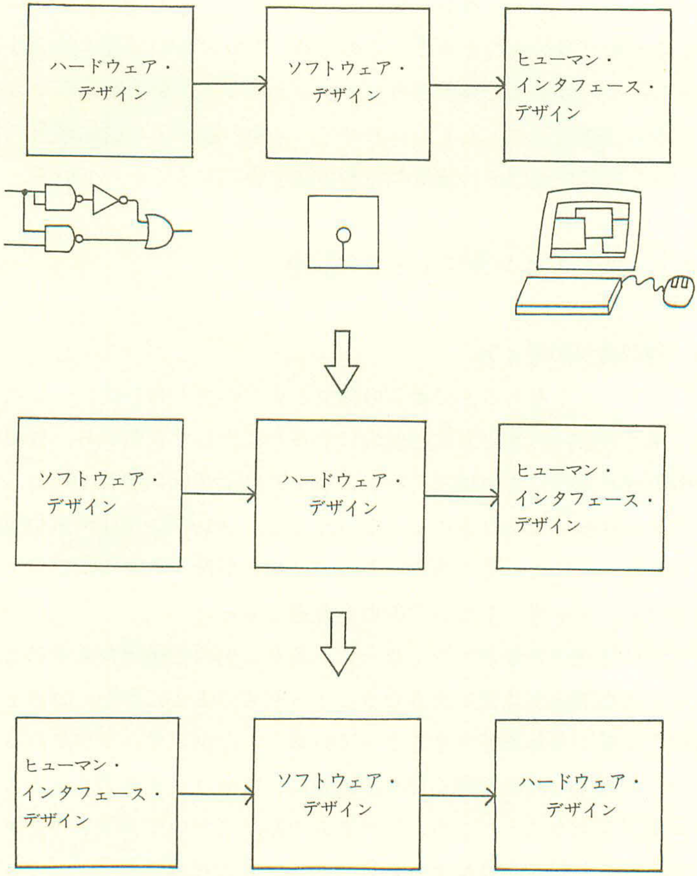


図 3.22　機器設計の考え方

は，システムの実現可能性やハードウェアのコストが最大の関心事でありハードウェア主導型の設計とならざるをえなかったわけであるが，このソフトウェア主導，ヒューマン・インタフェース主導はハードウェアが豊富になった時代の設計法である．こうした変化が新しいシステム設計の方向としていっそう進展していくであろう．

3.3.2　エキスパート・システム

現在，計算機の高度な応用として人工知能や知識工学などの複雑な情報処理

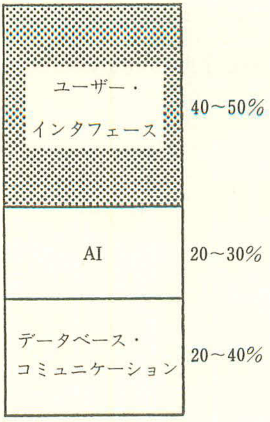


図 3.23　エキスパート・システムに占めるユーザー・インタフェースの割合

技術が開発され，これによって従来より優れたシステム・ビヘービアが実現されているわけであるが，その中に人間の専門家がする仕事をコンピュータが代替して行うエキスパート・システムがある．先ほどの CCV などもその 1 例かも知れないが，複雑なプラントのコントロールなど，従来は相当な名人でないとできなかったこと，あるいは名医でないとできないような診断をある程度代替して行うというものである．これは，人間の扱う知識をうまくとり込んでソフトウェアとしてデータベース化したものを使う．臨床の例でいえば名医が経験したさまざまな症状を数多くデータベースにして，それを適切に使用し新しく来た患者の診断を名医のごとくに，あるいは少なくともそれにかなり近いようなことが実現できないかということが考えられてきている．

これは単に名医がヒューマン・リソースとして少ないからというだけではなく，むしろこのエキスパート・システムが進歩したときに可能となる新しい利用法が期待されている．たとえば，非常に複雑でスピードを要する仕事を人間がしようとすると疲労しあるいは，あがったりすることもある．また，急に感情的な反応が起こって恐怖が先に立ったりするようなことが起こるが，そのような場合でも計算機ならば確実にその仕事を遂行することができる．そうした知識処理自体の新しい可能性というよりは，人間の得意でない部分を特に補うような意味のシステムの要求が出てくる場合である．それはたとえば原子炉が暴走しはじめたときの対策などもその 1 例であるかも知れない．

このようなエキスパート・システムのソフトウェアの構成を示した例が図3.23であるが，実際の推論部分あるいはデータベースとなる知識部分の合計と同じくらいの40〜50%はユーザー・インタフェースに使われている．これは新しいシステムの特徴の第2の点であり，ヒューマン・インタフェースのウェイトが実際非常に増えてきていることを示す．

3.3.3 AIマシン

図3.24はある会社の典型的な人工知能の機械である．この機械の特色は，設計を計画した最初の時点でまずヒューマン・インタフェースからスタートしていることである．独特なキャラクタをもった設計者が従来のハードウェアから出発するコンピュータの組み方ではなく，まず子供にとって最も使いやすい道具とはどのようなものであるかを考えた．子供が普段最も無邪気に道具を相手にするとき何をするだろうか．つまり，人間がだれからも教えられなくてももっている，人間自身の一番使いやすい方法に合ったヒューマン・インタフェースを考えて，それが実現できるようにソフトウェアを考える．そしてつぎにこんどはそれが実現できるハードウェアをつくるという，先ほどの一番あとに紹介したような設計順序でつくった典型的な1例である．これが成功したかどうかは別として，少なくとも人工知能的なマシンの典型の1つとして現在注



図 3.24　AIマシン (Xerox 1121)

目されている．

図 3.25 も同じようなマシンである．このようによりよいヒューマン・インタフェースを有するソフトウェア・システムを実現するという方向に現在向かっている．では，こうした方法で訓練期間まで含めてオペレータの生産性がどれくらい上がるであろうか．これは仕事の種類によっても異なるであろうが，一般的なソフトウェアで数倍に上がることが予想されている．ある種の実験では 1 桁くらい上がっている．

現在のソフトウェア政策上の最大のネックは，ソフトウェアの需要量に対して供給量が絶対的に足りないことである．日本ではおよそ 10 分の 1 しか供給できないといわれるくらい不足しており，これはもちろん世界的な傾向である．この問題を克服する 1 つの方向として，ヒューマン・インタフェースを非常に優れたものとすることが考えられる．つまり，トレーニングを必要としないとか，あるいは労働条件がよくなり心地よく仕事ができるという環境をつくり，それによって生産性を飛躍的に向上させるわけである．これらの機械はそのような意味で完成された形というよりもむしろ最近ようやく出てきた 1 例である．

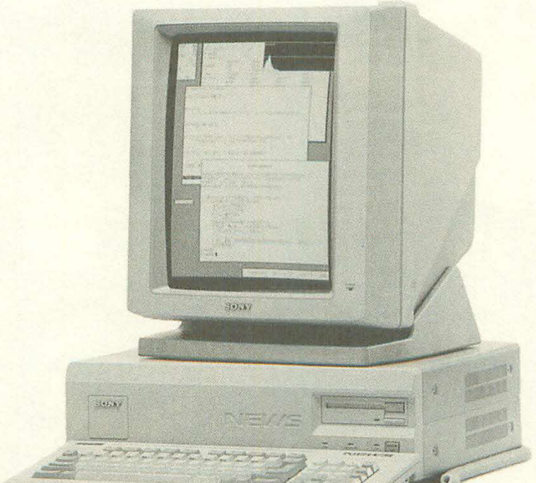


図 3.25　AI マシン (Sony News)

3.3.4 新しいマン・マシン・インタフェース技術

図3.26は，MITのメディア研究所におけるヒューマン・インタフェースの実験風景である．この研究所は，機械が人間に対して情報を提示するときのディスプレイ方法，あるいは逆に人が機械に対して入力する方法など，ヒューマン・インタフェースの問題を基本的に研究する目的で設立されたものである．

図3.27は機械に対して，手で指し示したり言葉で指示を与えたりしている．あるいはまた，操作する人間の顔の画像を解析してどこを見ているか機械が認識するというようなことをしている．人がどこを見ているかということを知るのは決して難しい技術ではない．われわれの研究室でも大学院の学生が，秋葉原で安い機器を買ってきて製作しても半年あるいは1年くらいで出来る程度の技術になった．視線の追跡は，眼球の画像をオンライン・リアルタイムで解析することで非常に安く簡単にできる．

たとえば実験室に自動車の簡単なシミュレータをつくり，フロントガラスの

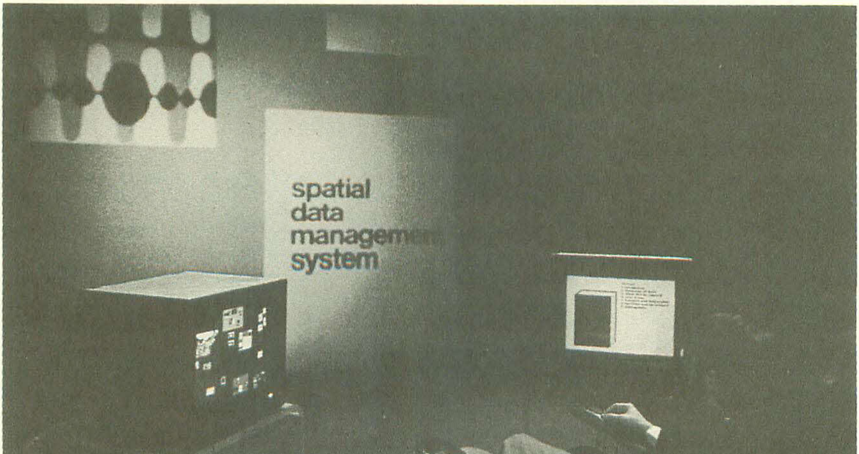


図3.26　メディアルーム(MITメディア研究所)(文献6)より引用)

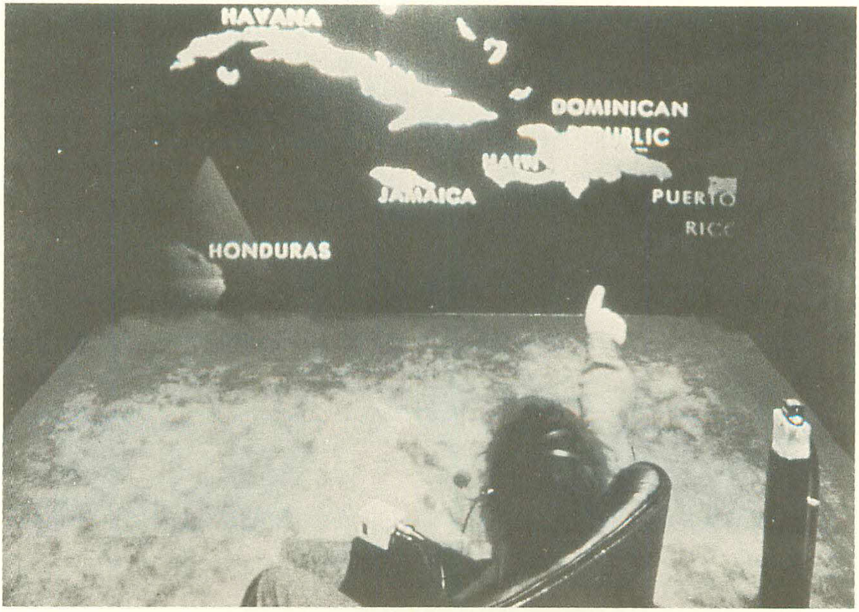


図 3.27 「それをそこに置け」音声と指示によって船をカリブ海のあたりに配備する(文献6)より引用)

付近にテレビカメラを置いてオンラインで視線を監視する．これにより，いまサイドミラーを見ているとか，いま速度計を見ているなどの判断をすることができる．ただし，こうしたことは実験室レベルでは可能であるが，実用化が簡単にできるかどうかはまた別問題である．たとえば夜間に周囲が暗くなって顔が見えなくなったらどうするか，あるいは急に日が差し込んできて顔の半面がハレーションを起こしたらどうするかなどということはまだ難しい問題で簡単には解決できない．つまり条件がよければ実験室の中で，この程度のことはいくらでもできるようになったというわけである．

こうした研究で人間の状態を知ることができれば，さらにこれを用いて機械の動作を人間の都合に合わせることが可能となる．たとえば人間がディスプレイを使用する場合，画面のほうを見ているときに映像を表示しなければ意味がない．現在のディスプレイは人間が見ているときもそうでないときでも表示されたままである．その意味では欠陥ディスプレイであって，人間に対する気配

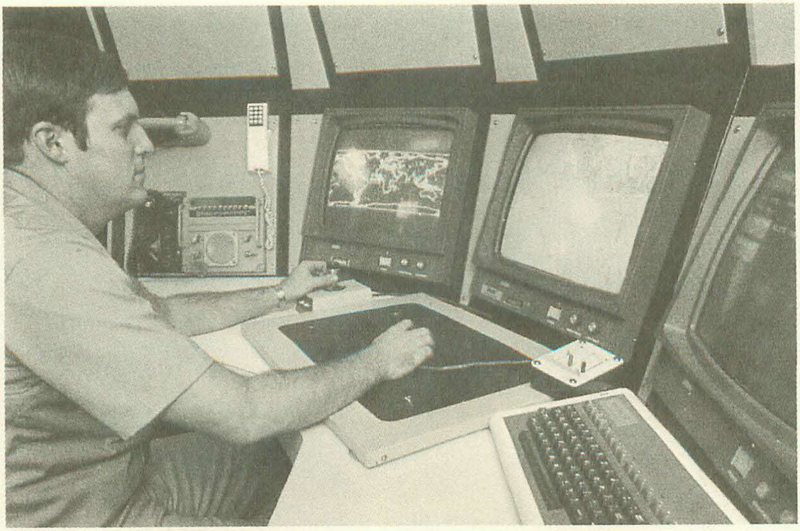


図 3.28 USS カールビンソンに搭載された CCA の空間的データ管理システム（文献 6）より引用）

りが全くなされていない．人が見ているか否かを機械が知ることができれば，その人が見なくなった後のディスプレイはホールドしておき，こんど再び見たときにその続きを表示すればよい．またじっと一点を凝視していれば，その点が見たいのだろうかとマークを表示してくるくらいのことは簡単にできるわけである．

こうしたマン・マシン・インタフェースを構築するためのハードウェア・デバイスは，急速に低価格化，多様化，高信頼度化が進んでいるわけで，これらの研究が単なる実験だけでなく，近い将来実用化に向かっていく可能性は高い．

図 3.28 は米国最新鋭空母カールビンソンに搭載されている実戦的なインタフェースである．世界地図を階層的に表示し指示しているが，こうした複雑な実用的システムにおいても，新しいヒューマン・インタフェースが検討されているという 1 例である．

図 3.29 は少々悪趣味であるが，人間の顔の形をディスプレイに使用しており，この顔は実際に動く．言葉を発するときに口が動いたり目玉が動くので多少気持が悪い．しかしながら，通常われわれが話をするときには人間の顔から

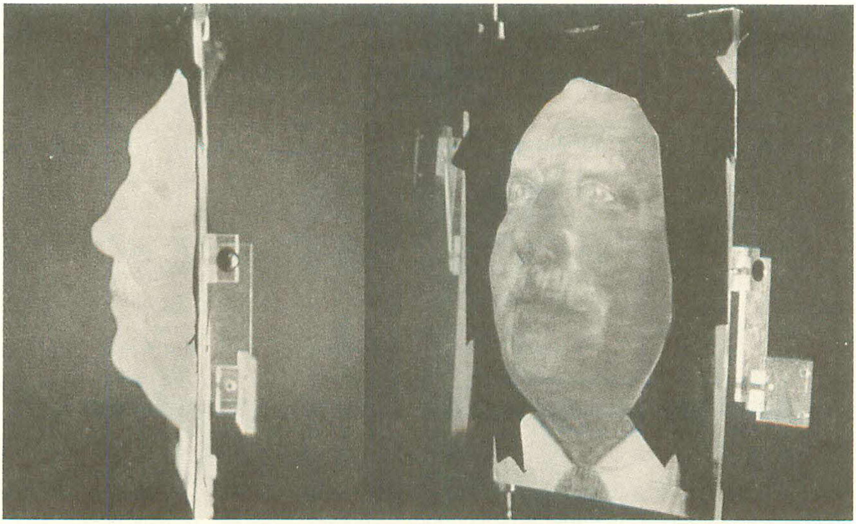


図 3.29　語り手の「代弁者(persona)」(文献 6)より引用)

声が聞こえてくるという状況はきわめて自然なものであるわけで，そうした実験も最近 MIT で行われている.

3.3.5　メンタル・モデル

人間と機械とのインタフェースの問題を考えるときには，当然人間それ自身の理解が基礎となる．図 3.30 は人間のもっている諸側面を概括したものである．ヒューマン・インタフェースはそれぞれの側面に対して異なった方法論に基づいて考察されてきた．その 1 つは従来から人間工学と呼ばれている物理的側面である．たとえば身長，座高，あるいは手の届く範囲に操作対象を配置するなどの物理的な問題である．これが十分に考慮されていないとわれわれは物理的に機械とうまくつき合えなくなる．たとえば，パソコンを無造作に机上に置いてしまうと，長時間の作業でたいてい腰が痛くなってくる．これは机の上に置いたことでそれだけディスプレイの位置が高くなっているためで，無理にその状態に姿勢を合わせているとやがて耐えられなくなり，長時間続けられない.

このような単純なことも当然最初に解決しておく必要があるが，つぎに考え

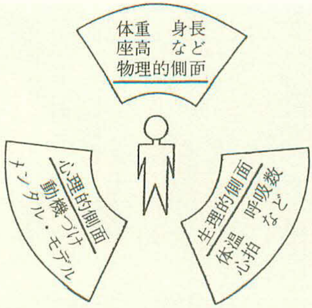


図 **3.30**　人間の各種側面

られる生理的側面では物理的なことだけではなくて，人間の知覚の問題や，部屋の温度，照明，あるいは筋肉の疲労などのさまざまな問題が入ってくる．さらにこうしたアプローチに加えて今後特に注目されるべき点は，機械と人間との情報的インタフェースであり，これは人間の心理的側面を扱うものである．

最近この新しい方法論に関してメンタル・モデルという概念が導入されている．これは人間にわかりやすい機械，あるいは機械と人間がよい関係をもてる理想的システムとは，人間の頭脳の中にそれらのモデルが容易にできることだとする立場である．つまり，知的な理解に基づいたメンタルなシステム・モデルが構成しやすいことである．たとえば原子炉をオペレートする人が原子炉のメンタル・モデルとして，原子炉を水の入ったバケツのように考えている場合もあるかも知れない．そうするとその人はバケツ・モデルを考えながらさまざまな行動をすることになる．したがって，メンタル・モデルが正しく構成できるように援助したり，容易に理解できるようなディスプレイの方法を考えるなどのいろいろな問題が出てくる．最近こうした基礎的研究も行われはじめている．

3.3.6　インテリジェント・ビルの考え方

情報機器が大量に使用されるようになると，人間と機械の接点が広範囲におよび，新たに住環境のレベルにおいても従来の枠組みを考え直す必要が出てくる．しかしながら，もちろん，従来の普通のオフィス・ビル，あるいは住宅の中にそうした情報機器を据えつければそれでいいではないかという考え方も当

然ある．それでもある程度の情報的な機能は発揮されるから，その中でも人間はかなり適応してそれらの機器を使いこなすことができる．

こうした事情について類似を求めれば，必ずしも適切な例ではないかも知れないが，はじめて電気製品が家庭に入ってきたときの状況をあげることができる．たとえばそこでは，家電製品の普及を考えない時代にできた従来の建物内に無理に電線を張りめぐらし，部屋の天井から電球がさがっている光景が見られた．さらにアイロンなどの家電製品を使うためにそこから二股ソケットなどを使ってつなぎ，まるでクモの巣のような状態でいろいろな家電製品を使っていたという時代があった．それでも確かに家電製品の機能自体は，古い環境内とはいえ確実に浸透していったのであるが，しかしその使用形態はあくまで暫定的なものであった．

現在の情報的な環境あるいはシステムの外側の状況を見ると，そうした現実が頻繁に見られる．これはもちろん近年に至るまでの情報関係の技術水準が低かったことが原因ではあるが，それが急速に進んできた状況では，情報のインフラストラクチャを完全にビルトインした環境を本格的に考えることが必要である．

図 3.31 はインテリジェント・ビルと呼ばれている東京のアークヒルズの建物である．このビルはテナント・ビルであり，この中に国際金融機関あるいは外国の会社なども入っている．ここでたとえばニューヨークの金融市場と取引することになると，時差があるので 24 時間体制となる．したがってまずこのビルが 24 時間使用可能であるという必要条件が出てくる．さらに情報機器がふんだんに設置されることになると，当然それだけの強度や配線が必要になる．配線はあとからでもできないことはないが，工事の手間や，工事の間運用が停止することを考えておかねばならない．電力の場合はすでに最初からコンセントを各所に張りめぐらしているが，これと全く同様に情報に関してもはじめから十分に組み込んでしまった構造を考えるわけである．さらに，たとえば衛星通信のパラボラ・アンテナを置いて海外との通信チャネルなども最初から確保するなど，徹底した情報機能の組み込み設計をしたのがインテリジェント・ビルである．

こうした配慮から，図 3.32 に見られるように 1 つの階のフロアには柱が全

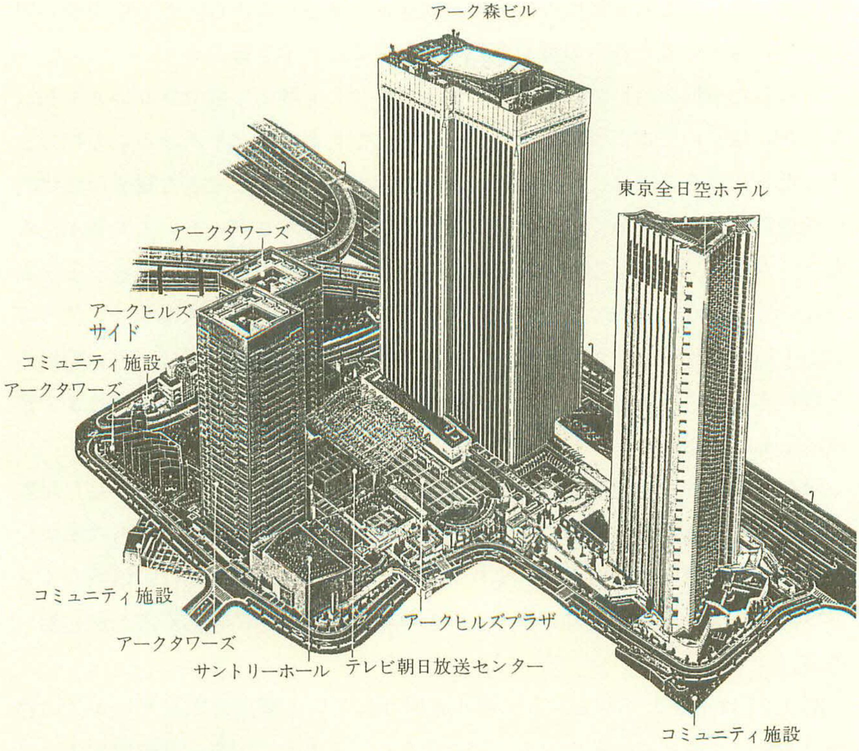


図 3.31 インテリジェント・ビル(森ビルパンフレットより)

くない部分が広くとられている．これはテナントビルであるため用途が特定できないことや，急速に成長したり変化が激しいビジネスの世界では，使用中にもレイアウトが変わる可能性があるからである．したがってどのようにでも仕切れる構造になっている．通常縦シャフトもあらかじめ多数設けておき，この中に電話線をはじめ，光ファイバを使った LAN のような高性能情報チャネルが準備されることになる．

また，図 3.33 に示すように，床はすべて二重の浮床構造になっていて，ここに電話線やディジタル配線などが引き回されている．したがってどこかを開ければ簡単にそこから取り出すことができるわけで，改めて大工事をする必要がない．つまり，当初から情報機器が置かれるという前提で考えられている．このような環境があってはじめてその中に情報機器がふんだんに置ける．事実

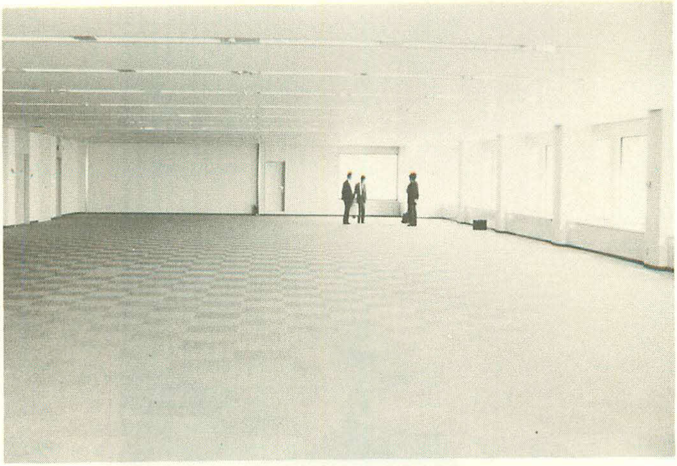


図 3.32　柱の少ない内部構造

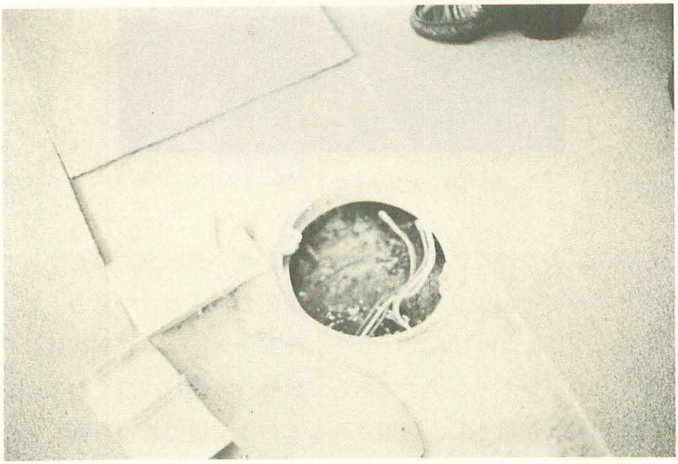


図 3.33　浮床構造のフロア

こうしたインテリジェント・ビルでは，オペレータの 1 人あたりの占有面積は普通のビルの 2 倍くらいある．それは贅沢をしているのではなくて，1 人が使う情報機器が多いこと，つまり情報装備率が高いということを示している．

その代り 24 時間体制で動くのでビルの活動の効率はきわめて高い．暫定的にただ機器が散在して置かれた情報化とは全く違った新しい本格的システムに



図 3.34　光ファイバで太陽光を地下へ

ふさわしい環境，あるいは情報のインフラストラクチャを，最初からつくっておいてこそはじめてそのような高い効率が達成できるわけである．こうした設計はさらに進んで，1つのビルだけでなく都市全体についても同様に構想され，それがインテリジェント・シティである．政府(建設省など)も最初から本格的に情報がふんだんに使用され，活用されるという前提で都市計画を考える方向に動き出している．

図 3.34 は太陽光を光ファイバで地下の駐車場に導いている試みである．木々を植えてなるべく緑を増やしたり，あるいはバード・ウォッチングもできるようにするなど，人間的な配慮も十分にすることが考えられている．これにはいろいろな見方があるが，ある意味でここでは 24 時間フル稼動のいわば人間にとってテクノストレスが溜るような環境になるわけであるから，このような環境とバランスをとるための(マクロな)インタフェースとして，こうした緑

とか自然などの人間がリラックスできる空間を積極的につくることになる．そうでないと短期的にはともかく，長期的には人間がテクノストレスで障害を起こしてしまうからである．

これは都市のオフィスだけではなく，最近では工場なども同様である．つまり，工場の中でもFA (Factory Automation) が徹底している工場では，きわめて高度な情報システムを介して作業がなされ，同様なテクノストレス的な状況が増加している．こうした環境に対応したヒューマン・インタフェースとしては，人々を心理的な側面からリラックスさせる工夫が必要である．たとえば機械工場などではホット・コーナーを設けたりしている．これは熱いという意味のホットではなく，気持が「ほっとする」休憩場所の意味である．そこには日本庭園のようなものがあったりして，できるだけリラックスさせようという配慮がなされている．そうした方向でマクロな高次のレベルでのヒューマン・インタフェースもよりよく改善しようというのである．現在のヒューマン・インタフェース設計では，こうした全生活環境にわたって注意が傾けられている．

3.4 おわりに

新しいシステムに関連するすべてのことを述べる十分な紙面はなかったが，本稿ではその中で2つの点について概説したわけである．

その第1点は，システムの構造自身に関するものであり，計算機の分散化，自律化による非常に柔軟なシステム構造，あるいはソフトウェアによって実現される動的な安定性を有するシステム構造の例を紹介した．また，キーワードとしてホロニックなシステムをとり上げ，その考え方を説明した．

第2の論点は，ヒューマン・インタフェースの設計である．いろいろなレベルにおける人間と機械の共存のためのインタフェースが注目されているが，それらの設計技術あるいは考え方を紹介した．具体的にはデバイスの人間工学からはじまり，都市的な環境に至るまで現在考えられている新しいインタフェースの方法論を述べたわけである．

参考文献

1) 日経エレクトロニクス 1985. 6. 3, (No. 370), 211, 1985.
2) 日経エレクトロニクス 1986.12.1, (No. 409), 173-178, 1986.
3) *LAN Components User's Manual,* Intel, 1984.
4) 広瀬通孝, 集中から分散へ, ヒューマン・サイエンス 4, 中山書店, 25-51, 1984.
5) 上篠史彦, ソフトウェアのコストについて, 情報処理, **21** (10), 1050-1056, 1980.
6) リチャード・A・ボルト, マン・マシン・インタフェース進化論, パーソナルメディア, 1986.

4 船の設計

東京大学工学部船舶工学科教授　小山　健夫

4.1 はじめに

「衣食足りて礼節を知る」といわれる．現在の日本の社会は，不足の状態を克服すべく懸命の努力を重ねた結果，ふと気がついてみるといつの間にか充足の時代を迎えてしまった状態といってよいであろう．不足の時代においては製品の供給は何の疑いもなく善であり「良いものを安く供給する」という行為は日本工業社会の合言葉であった．

何らの疑問も感じなかったこの行為が，国際経済の中で急激な不均衡を発生させ，その原因の当事者は当惑し，なす術を失っている．「良いものを安く」という目的そのものに疑問符がつけられているにもかかわらず，その矛盾を「より良いものをより安く」という形で解決しようと努力せざるをえないところに問題の困難さがある．不足の解消を求めて回りはじめた歯車の慣性はあまりにも大きく，「衣食足りた」状態になったいまも「礼節を知る」という方向に回転を変えることは困難のようである．

充足とは供給が需要を上回る状態である．農業や漁業においては，大豊作や大漁によって一時的にこのような状態が発生することがあった．しかし，工業製品において継続的に供給が需要を上回ることはかつてなかった現象である．需要がないのは，高くて手が届かない，あるいはより良いものが出来たことによって陳腐化したためと理解され，潜在的需要は無限であることが公理のように考えられてきた．

大量生産品に限定すれば，現在明らかに工業製品も充足の時代となっている．いいかえれば，われわれは需要を上回る生産手段を手に入れた．需要さえあれば限りなく供給を増加しうる手段を得たといってもよい．かつて高度な工業製品は長年の熟練を経たクラフツマンの手によってのみ製造され，そのため生産量には限界があった．しかし，現在の高度生産システムをもってすれば，クラフツマンは不要であり，その生産能力に限界はない．

製造工程はあらゆる面から分析しつくされ部品は徹底的な品質管理・精度管理がなされて，不良品率などという言葉が古典的な響きさえもつに至っている．品質管理・精度管理が不徹底な部品を使って物をつくろうとすると大変な労力を要する．ある部品を組み込もうとしてうまくいかないときは，うまくはまる部品を探さなければならないし，それが見つからなければ部品を手直しして何とかはまるようにしなければならない．このような作業をこなせるのは相当の熟練を経たクラフツマンのみである．管理が徹底してくると，部品の精度が悪いため組込みに苦労するようなことはありえない．部品は決められた場所につねにキチンとおさまるし，おさめるための手直し作業などはありえない．組立てに工夫も手直しも不要であれば，その作業はすでにクラフツマンの仕事ではなくなっている．パートタイマでもよければロボットでもかまわない．ここまで生産システムが高度化されると，人を使うかロボットを使うかの判断が，機能面よりもコスト面で行われる．コスト低減のための海外立地による産業の空洞化が危惧されているが，クラフツマンシップという面から見た空洞化は既成の事実となっている．

供給が需要を上回る状態は企業家にとっては苦難の時代かもしれない．あるいは刺激的なゲームの時代という受取り方もあるかもしれない．需要の創出，差別化の実現などという表現の中に飽くことのない挑戦の意志を感じとることができる．しかし，技術者にとってみれば，需要を上回る生産能力を高度生産システムという形で達成したことは，まさしく夢の実現であり，明らかな勝利である．経済摩擦の元凶は高度生産システムそのものにあるのではなく，この新しく強力な武器を人類の福祉に向けて有効利用できないでいる社会の仕組み，あるいは発想の転換先を発見できないでいる社会のあり方にある．

高度生産システムの生産現場においてのクラフツマンシップは不要のものと

なりつつある．しかし，生産システムそのものの改良・革新には従来以上の技術力の投入が必要である．多様化するニーズに適応して，あるいは全く新しい製品の提供に向けて，創造的かつ柔軟な生産システムをつくり続けなければならない．この目的のためには，在来型の画一的大量生産システムを脱皮した，FMS・CIM が求められている．

大量生産システムが高度化する一方で，個別注文生産品の製造工程には顕著な進展が見られない．産業社会の高度化により，使用部品の高度化，ロボットをはじめとするオートメーション技術等の波及により，外見上相当大きな変化があるように見えるが，単品生産であるが故に大量生産品のような管理が，設計面においても製造面においても実現できていない．結果として製造現場のクラフツマンシップに依存した生産システムとなっている．

技術者としての夢は，つくりたいと考えたものに対して，生産システムの制約があるべきではない．数が揃わなければ合理的なコストの範囲内で生産できない，あるいは熟練工の存在なしには生産できないというような制約から脱却すべきである．個別注文生産品の設計を生産システムの制約から解放するということは，FMS・CIM の究極の姿であろう．

工業技術の手法は，それぞれの製品別に独自のものがあり，極言すれば製品の数だけ設計の手法があるといわれる．このことは，個々の製品の機能が異なるとともに，生産システムによる制約が強いことにも起因している．生産システムによる制約からの解放の道が拓けつつある現在，個々の製品の特性を越え，より抽象化された設計手法の展望がありうるのではないか．

船は各種プラント製品とならんで，個別注文製品の代表例の 1 つである．個別注文生産品の設計製造システムの将来を考える上でのケース・スタディとして，現状の問題点を整理し，その解決のための展望を試みたい．

4.2　船について

造船設計を説明する前に，船についての必要最小限の事項を紹介しておきたい．

表 4.1 船の種類

- 船
  - 軍艦
  - 商船
    - 客船
      - Liner
      - Cruiser
      - Ferry Boat
    - 貨物船
      - 一般貨物船
        - Liner
        - Tramp Ship
      - 専用貨物船
        - Oil Tanker
          - Crude Oil Carrier
          - Product Carrier
        - Bulk Carrier
        - Ore Carrier
        - Gas Carrier
          - LPG
          - LNG
        - Car Carrier
        - Ferry Boat
        - Ref. Cargo Carrier
        - Heavy Lifter
        - Chemical Tanker
        - ……
        - ……
  - 特殊船
    - 漁船
    - 作業船
      - Tug Boat
      - Oil Rig
      - Supply Boat
    - 調査船

4.2.1 船の種類

船の種類を整理すると表 4.1 のようになる．目的別に軍艦，商船，特殊船に大分類して考えている．軍艦の目的は自明であるが，商船と特殊船は，輸送サービスを目的とするか否かによって分けている．漁撈，海上作業，調査その他，輸送を主目的としないものはすべて特殊船である．大多数の船はこの意味において商船であり，ここでも主として商船に主眼をおいて話を進めたい．

輸送サービスの対象が人か貨物かによって，商船は客船と貨物船に分類される．1960 年代までは定期旅客船が外国航路の花形であり，特に大西洋航路で

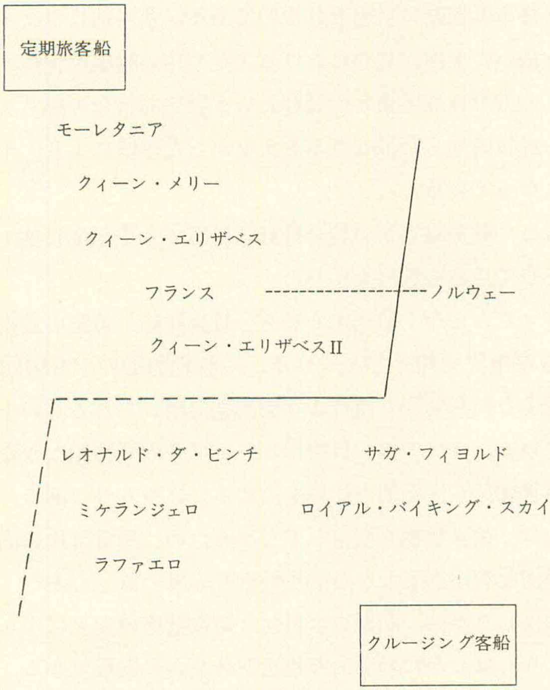


図 **4.1**　客船の変遷

覇を競っていた．モーレタニア，ブレーメン，クィーン・メリー，クィーン・エリザベスなどが定期旅客船時代の代表であり，フランス(現ノルウェー)が現存最後のものといってよいであろう．これらの客船はジェット旅客機の急速な普及の前に存立意義を失う結果となった．

豪華客船が覇を競い合っていた一方で，イタリアではレオナルド・ダ・ビンチ，ミケランジェロ，ラファエロなどが建造された．当時の代表的客船に比べると，サイズも小さく速力も遅いものであったが，軽快なデザインで話題を呼んだ．このクラスの船は，旅客船時代の終了とともにカリブ海を中心としたクルージング，あるいは世界一周クルージング等で成功を収め，客船クルージング時代の幕開けとなった．現在クルージングの需要はますます拡がりつつあり，北欧諸国を中心に毎年数隻の建造が行われている．

現在最高の豪華客船クィーン・エリザベスII世は，旅客輸送が客船からジェ

ット旅客機へ移る転換期に計画された船である．基本的にはクィーン・メリー，エリザベスと続いた大西洋航路における大英帝国の権威を保持するという姿勢をもちつつ，一方では旅客機との競合という歴史的宿命を感じ，合せてクルージングによる経営戦略も意識せざるをえなかった事情により，中途半端な性格をもった船になっている．

貨物船の方は，航空輸送との競合分野は無視できる程度に狭く，世界経済の規模拡大に応じて急速な進展を示した．

貨物を特定することなく輸送する船を一般貨物船，特定の貨物輸送専用に使用される船を専用貨物船と呼んでいる．一般貨物船のうち定期貨物船をライナー，不定期すなわち貸切り便のような形態で用いられるものをトランプ・シップと呼んでいる．かつては，貨物船といえばこの2種類しかなかったが，現在では，専用貨物船が圧倒的な比重を占めるにいたりつつある．

専用貨物船は，輸送貨物を限定してしまうため，通常は片道満載片道空荷という一見不経済な利用形態となる必然性をもっている．しかし，特定の貨物の輸送量の増加にしたがい，船型の大型化，荷役効率の向上によって一般貨物船による輸送よりもはるかに経済的な輸送システムを実現できる．代表的専用船として石油タンカー，鉄鉱石専用船，石炭・穀物などをバラ積みで輸送するバルク・キャリアなどがある(図4.2)．

コンテナ船は標準化されたコンテナの中に貨物を積んで運搬する新しい形態の定期貨物船である．不特定の貨物をコンテナという形で標準化することによって荷役の合理化を行うとともに，陸上でのトラック，鉄道等による輸送と一貫化させることによって door to door の輸送システムを実現している．輸送する貨物から見れば専用化とはいえないが，輸送手段である船から見れば，「コンテナという特殊貨物」を輸送する専用船と見ることができる．

自動車運搬船は，製品輸送の面でも輸送量の増加に伴い専用化された船ができるという好例である．日本の自動車輸出の急増により「製品としての自動車」のみを輸送し，大型のものでは一度に6,000台もの自動車を輸送する．

LNG タンカーは，メタンが主成分である天然ガスを低温で液化して輸送する，特殊貨物の専用船である．低温であるためタンク部には鋼材が使えず，アルミニウムやステンレス鋼が使用される．タンク部の防熱，荷役装置等にも高



(a) Oil Tanker



(b) Car Carrier



(c) Bulk Carrier



(d) LNG Tanker



(e) Container Ship

図 4.2 専用貨物船(三菱重工業株式会社提供)

度な技術が要求される．

4.2.2 船の力学的特徴

水面に浮かぶ丸太など浮力材につかまって川を渡るところからはじまって，それが筏となり丸木舟を経て，より大きくより速くという形で現在の船に発達してきたものと考えられている．船の力学的な最大の特徴は，空気と水の接す

る水面上で，浮力によって支持されているという点につきる．この特徴から発生する，復原性(Stability)，速力(Speed)，強度(Strength)が船の力学で3つのSといわれるテーマである．

(a) 復 原 性

水面上に静止している船の重力と浮力はつり合っており，重心と浮心の関係は図4.3(a)のようになっている．重心が浮心より上にあると不安定のように思えるが，船の傾斜によって浮心位置が(b)のように移動するため復原モーメントを生ずる．このモーメントのレバーを復原梃と呼ぶが，これを傾斜角に応じて求めると(c)のようになる．静的に傾斜させる限りこの値が正の範囲ならば直立状態に戻る．この範囲は通常の船で60°～70°，特殊救命ボートではすべての姿勢で復原力をもつようにつくられているものもある．

空荷の船に貨物を積むと喫水が深くなる．100×20 mの長方形断面をもつ箱を1 cm沈めたときの浮力が20 tであるという大まかな尺度をもっていれば，積荷と喫水の感覚がおよそ得られる．計画した積載量を確保するための船のサイズは浮力との間で一意的な関係をもつ．深い喫水を採用できれば，喫水線上の断面積，すなわち船の長さと幅を小さくでき，あらゆる面で経済的な船を得ることができる．しかし，通常はほとんどすべての船にとって喫水制限が課せられ，力学的に最適なところまで喫水を深くできるケースはない．

空荷状態で航行しようとすると，図4.4(a)に示すように，プロペラが水面上に出てしまい，船首部も水面上に突出して波をたたき，破損の原因ともなりかねない．浮力重力の静点バランスにより浮いている以上，何らかの積荷を行

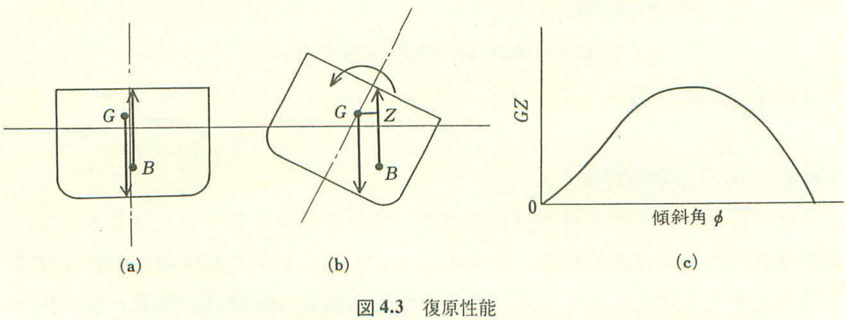
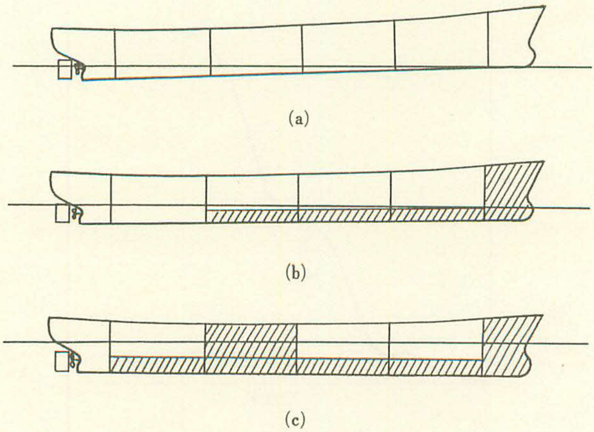


図4.3 復原性能



(a)　(b)　(c)

図 4.4　バラストによるトリミング

わない限り正常な航行可能状態とはならない．通常(b)のような形でタンク内にバラスト水を張水してこの状態をつくる．荒天時にはさらに喫水をとるため，(c)のように船倉内にも張水する場合がある．

(b)　速　　力

船の速力と抵抗の概念的関係を図 4.5 に示す．低速時は摩擦抵抗が主体で，およそ速力の 2 乗弱に比例して増加するが，高速域においては造波抵抗が主体となって傾向的には速力の 4 乗に比例した抵抗を受ける．

摩擦抵抗は粘性によって水の中に生ずるせん断力によるものであり，熱エネルギーとして散逸される．平板の場合，乱流域での抵抗係数はレイノルズ数に対しわずかに右下りとなり，これが速力の 2 乗弱の抵抗となってあらわれる．このほか，3 次元形状として見た船体各部から渦が発生し，抵抗増加の要因となっている．

造波抵抗は水面上に船があるために生ずる船特有の抵抗である．船が走ることにより，水面上に波を発生し，その波が無限遠に伝播することによってエネルギー散逸が起きる．波の発生場所は，船の進行方向に見て断面形状の変化の激しいところ，すなわち船首船尾に主として発生する．

造波抵抗現象として興味深いのは，無限遠に伝播する波によって造波抵抗が発生するため，たとえば船首波と船尾波が干渉し，伝播する波の波高が小さく

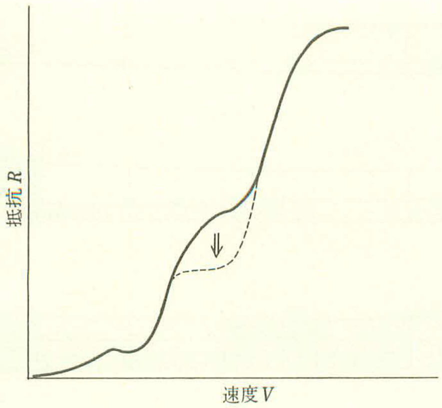


図 4.5　船の抵抗

なった場合は造波抵抗が小さくなる．波長は船速によって変わるため，造波抵抗には図 4.5 に示すような船速による変動が生ずる．

この現象を積極的に利用したのがバルバスバウであり，船首にとりつけたバルブと船首波を干渉させることによって大幅な造波抵抗減少効果を得た．現在では，この方法をさらに発展させ，船体各部で発生する波を，いわばシラミつぶしに干渉させ合うことによって，計画速力での造波抵抗をほとんど無視できるところまで減少させている．

(c)　構 造 強 度

船を 1 本のはりと見たとき，そのはり全体にかかる荷重条件は図 4.6 のようになる．船の長さ方向に分布する，船体構造そのもの，機関をはじめとする艤装品，貨物などによる重力を，同じく長さ方向の没水部断面に比例して分布する浮力によって支えている．

鉄道車輌，自動車などが車輪により，飛行機が主翼に生ずる揚力により集中的に荷重を支えているのに比べ，分布浮力により支えられている船は荷重条件が非常に緩いといえよう．荷重と浮力の分布を完全に一致させることができれば，ほとんど無荷重の状態となる．別の見方をすれば，力学的には船の大きさには制限がないといえる．

荷重と浮力をバランスさせておいても，波の中に船がおかれた場合は条件が変わる．図 4.7 に示すように，波の山が船体中央にくると，中央部の浮力が船

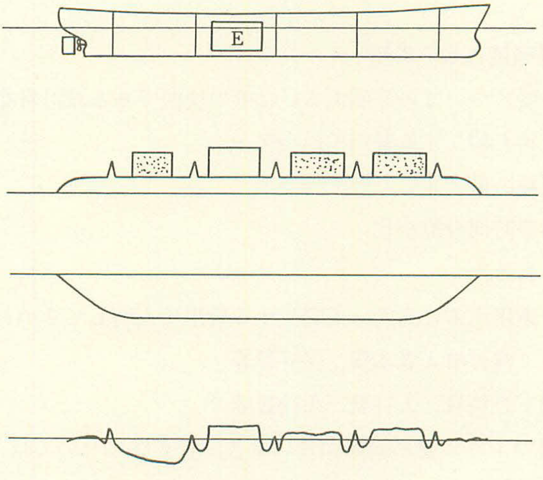


図 **4.6**　船にかかる荷重

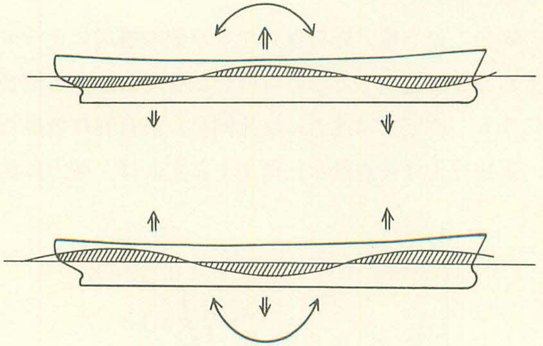


図 **4.7**　波浪による曲げモーメント

首尾に比べて大きくなり，谷がくればその逆となる．船の全体強度に対する要求は，通常考えられる積付状態において予想される荷重と浮力のアンバランス分と就航航路において予測される波浪荷重の大きさとによって決められる．

船が大きくなるにしたがい，図 4.7 のように船の長さに一致するような波長の波と遭遇する可能性は小さくなる．したがって，船の長さが 200 m を越えるような巨大船では，波浪荷重に対する船体強度の要求が緩和される．

4.2.3　輸送機械としての船

輸送機械一般についての評価あるいはその反映である設計目標として，

(1)　単位貨物を輸送する費用の最小化

(2)　運賃収益の最大化

(3)　輸送所要時間の最小化

などがあげられる．

輸送機械を運用するにあたって発生する費用は大別して2つに分けられる．

(1)　固定費：機械購入資本費，保守費等

(2)　運用費：燃料費，人件費，荷役費等

船や航空機のように運用期間が長い場合，資本費については NPV (Net Present Value) 法などによる Cash Flow に対する時間の影響に十分配慮しなければならない．NPV 法をとるとした場合，割引率の設定いかんによって相当異なる設計となる場合がある．

船の運航費の場合，資本費と燃料費の比重が他の費用に比べて圧倒的に大きい．単位輸送量あたりに発生するこれらの年間費用を速力の関数として見ると図 4.8 のようになる．固定費は速力に反比例し，燃料費は低速領域で速力の2乗に比例する．運賃収入は輸送量に比例するとすれば，速力に比例する．した

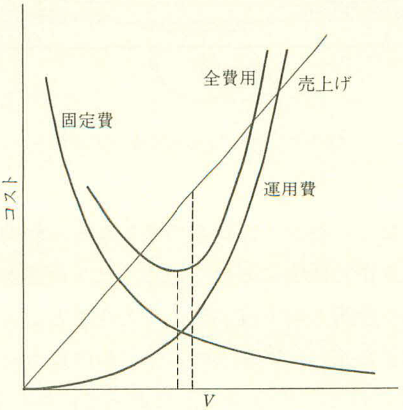


図 4.8　単位貨物あたりの輸送コスト

表 4.2　代表的な就航形態

(a) 低速大量輸送

	航　　路	積載量 (ton)	速　力 (knot)	年間航海数 (回)
VLCC	中東→日本	250,000	14	7.5
Container	日本→北米西岸	2,000 TEU	20	12
Ore Carrier	日本←ブラジル ↓　　↑ 豪州→西欧	190,000	13.5	2.7
Bulk Carrier	日本←ニューオルリンズ	45,000	14	5

TEU：Twenty Feet Equivalent Unit (20 フィート・コンテナ換算積載個数)

(b) 航空機との輸送力比較

B747-F	80 t＊500 knots ＝	40,000 t・mile/h
Container	20,000 t＊ 25 knots ＝	500,000 t・mile/h
VLCC	200,000 t＊ 14 knots ＝	2,800,000 t・mile/h

がって，輸送費用最小を実現する速力よりも運賃収益を最大化する速力が一般には高い．運賃に速力の大きさの評価(時間価値)が加わればこの差はさらに拡大する．このように設計の目的のおき方によって，基本性能である速力の設定にかなりの差を生ずる．

輸送機械の能力はマクロには積載能力と速力の積によって決まる．船の場合，その力学的性格からサイズには制限がない．船体を構成する鋼材は寸法の2乗に比例するのに対し積載能力は3乗で増加する．推進抵抗についても造波抵抗が顕著とならない低速域においては全く同じ関係が成り立つ．したがって，船の力学的特徴を生かした輸送形態は「低速大量輸送」にあるといえる．

表 4.2 に代表的な就航形態を示す．長距離輸送であるとはいえ，年間 10 回以下という航海数は普通の常識では信じられないほどの特異な輸送形態であることを示している．低速であっても積載量が大きいため，単位時間あたりの輸送力は航空機と比較して桁違いに大きい．

4.2.4　造船需要の市場規模

造船市場は昔から「10 年 1 山」といわれるほど需要変動の大きい市場であ

表 4.3　世界船腹量と代替需要

(a) 造船の市場規模（世界）

	船腹量（千 GT）	隻数
100 GT 以上	420,000	76,000
4000 GT 以上	380,000	18,000

(b) 年間造船需要（代替分）

	建造量（千 GT）	隻数
100 GT 以上	21,000	3,800
4000 GT 以上	19,000	900

る．この変動は市場の構造上やむをえない特徴であり，産業機械市場の需要変動と似た性格をもっている．市場の根拠となる現存船腹量は，表 4.3 に示すとおり 4,000 総トン以上の船が世界全体で 3.8 億トン，隻数にしてわずか 18,000 隻である．船の寿命を 20 年とすれば，年間の代替需要は 1,900 万トン，隻数では 900 隻にすぎない．経済規模拡大による輸送需要を加えて，約 2 千万トン，1,000 隻，金額にして 4 兆円程度の市場である．これまで日本は 50％前後の市場シェアを維持してきた．

大手造船所といわれる企業においても，年間建造隻数は 30 隻程度であり，一般の機械製造業とは全く性格が異なり，プラント製造業の形態として考えるほうがわかりやすい．

4.3　造船設計の現状

4.3.1　設計建造手順

現在行われている設計から建造までの一般的な流れを図 4.9 に示す．

(a)　基 本 計 画

基本計画段階では，船主の要求を満たすための諸元の決定が行われる．船主の要求する機能は運航者としての立場からの意志の表明であり，それを満足する実体としての船を造る立場からの表現ではない．要求そのものの概念が固まっていない場合も多く，また関心のある部分にのみ注意が集中し，重要な部分についての言及が不十分である場合もある．

これらの不明確な点を明確にし，技術的可能性を確認しながら要求機能を整理するためには，かなりの回数打合せを繰り返す必要がある．

諸元決定手順は，基本的事項を仮定した上でその他の諸元を決定し，全体としてのバランスが整うまでプロセスを繰り返す，いわゆるデザイン・スパイラ

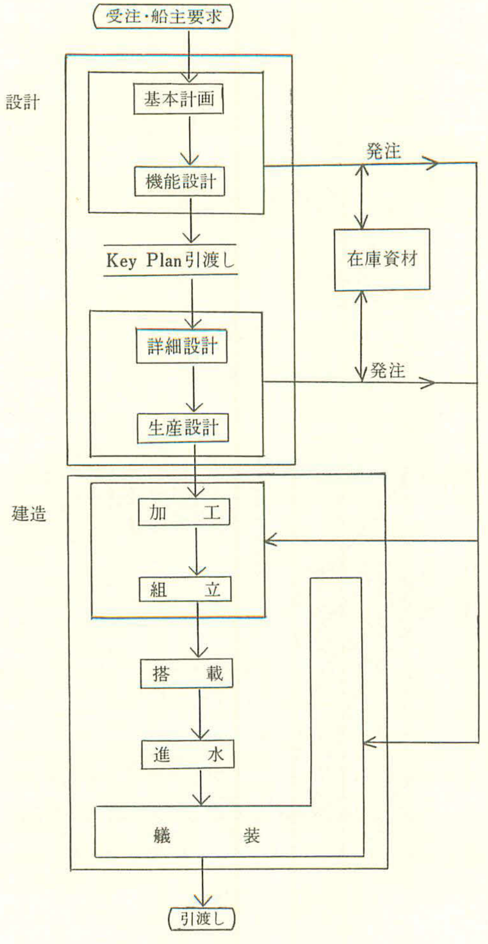


図 **4.9**　船の設計から完成まで

ル上での作業である．船の場合，積載能力と速力が最も重要な機能要求であり，積載能力を確保した上で要求される速力を得るための最適な寸法比がデザイン・スパイラル上の基本事項とされている．

寸法比の中でも，長さ幅比(L/B)，ファインネス係数(C_b ＝排水容積/長さ×幅×喫水)が重要で，この２つの値によって船のおよその形状，指定速力における抵抗，すなわち推進機関の所要出力がほぼ決まる．

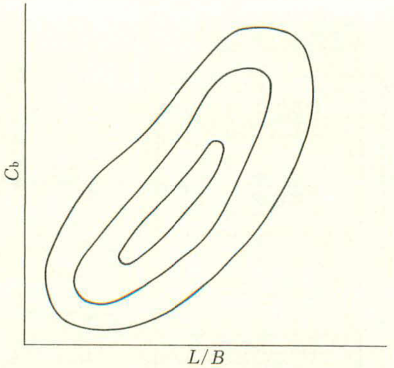


図 4.10　最適寸法比

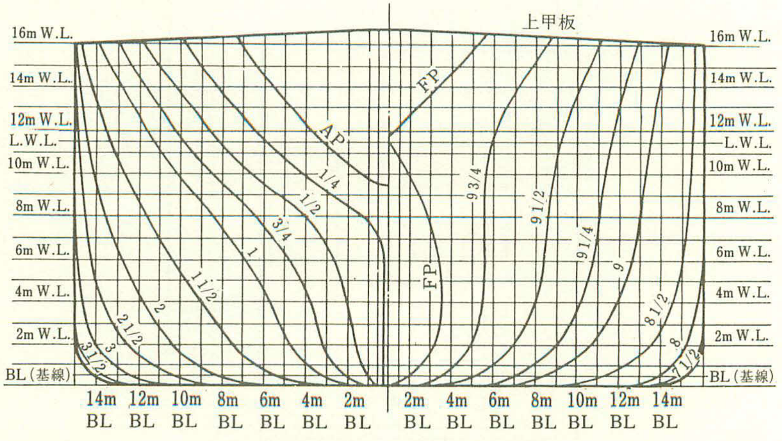


図 4.11　船の外形(Lines)

図 4.10 に単位輸送量あたりの輸送コスト，あるいは収益が，L/B および C_b によってどのように変わるかを概念的に示す．建造価格のうち使用鋼材量はかなり大きな比重をもつ．これを減らすためには L/B を小さく，寸づまりの船にすればよい．しかし，L/B を小さくすれば抵抗が増え，機関の所要出力が増加して燃料消費も増える．C_b を小さくして船型をファインにすれば，抵抗増加をある程度抑えることができるが，曲面の部分が増え荷役上不便になる場合もあり，加工のための工数増加にもなるという関係がある．

船体の概略形状[1] は Lines と呼ぶ各方向での断面図(図 4.11)で表現されるが，

L/B，C_b の 2 個のパラメタにより Lines の基本的な形がかなりの程度決定づけられる．これが決まれば，船内諸区画の配置を検討し，想定される運航条件下で姿勢制御がうまく行えるか，貨物の積荷条件によって過大な応力が発生するおそれがないかなどを調べる．

(b) 機 能 設 計

機能設計段階では，船体についての流体力学的，構造力学的検討が行われるとともに，要求機能を満たすために必要な艤装品の検討が行われる．

流体力学的検討では，船体まわりの流線を計算し，抵抗増加の要因をつぶしていくとともに，確認のための模型試験の準備を行う．抵抗推進に関する検討とともに，波浪中での運動性能，操縦性能について検討し必要があれば基本計画で決めた Lines の修正を行う．この段階での Lines の修正は局部的修正ですむ場合が多く，基本計画段階まで戻らなければならないようなケースは少ない．

構造力学的検討においては，船の中央部の代表的断面構造の決定が主な作業である．中央断面構造が決まれば，それを前後方向に延長することによって全体の構造がほぼ決定されるとともに，必要な鋼材が種類別に推定できる．

主機関をはじめ，発電機，ポンプ，荷役・係船機械など主な艤装品についての仕様はこの段階で決定され，かなりのものの発注が行われる．艤装品の多くは注文生産であり，早期に発注しておかなければ船全体の工程計画をくずしてしまう可能性がある．

機能設計が終わるまでの段階を基本設計と呼び，その成果を Key Plan という．欧米では設計と建造の組織が分離しているケースが多く，Key Plan をもとに船をつくることが造船であると狭く解釈される場合がある．

日本では，ほとんどの場合 Key Plan の作成から建造まで一貫して同一の造船所で行われるが，いったん Key Plan が完成して船主がそれを承認した場合，それ以降不都合が生じた場合でも Key Plan 以前に戻さないのが慣習となっている．

(c) 詳細設計・生産設計

Key Plan をもとに部品単位に展開するのが詳細設計であり，板から個々の部品をどのように切り出すかなどの生産情報を付加するのが生産設計である．船体工作のほとんどはガス切断，溶接という熱変形を伴うものであり，精度管

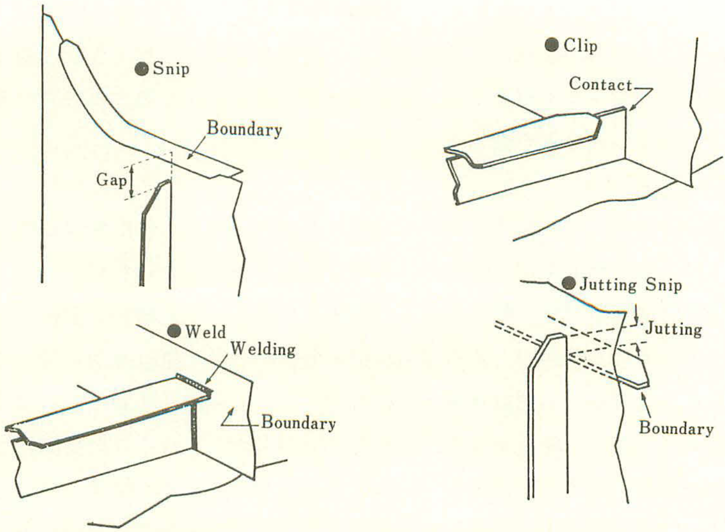


図 4.12　部材の端部処理

理上生産情報の付加は非常に重要な役割をもつ．諸機械間の配管配線計画の詳細もこの段階で行われる．

詳細設計，生産設計の切りわけは概念的には理解できても単純に割り切れるものではなく，各造船所によってその切り口は異なる．特に CAD/CAM 化の進展は必然的にこれらを統合する方向にあり，将来この区分けの必要はなくなるものと考えられる．

この段階での作業のうち船体構造を例にとって述べると，たとえば Key Plan から渡される Lines (船体形状) は機能設計を行うに十分な程度の精度しかもっていない．これをもとに，工作に十分な精度をもった図面に展開しなければならない．構造図についても主要な寸法，板厚は指示されているものの，図面に記入されている線が，工作上の配置において板のどちら側の面を示すかについて必ずしも明らかでない．部材の端部の工作をどのように行うか (図 4.12)，交差する部材についてはどちら側を貫通させるか，また交差角が直角でない場合，溶接のための開先をどのようにとるか (図 4.13) など，すべての細かい点はこの段階に任せられている[2)]．

正確な部品図が得られたのち，これらを鋼板からできるだけ無駄なく切り出

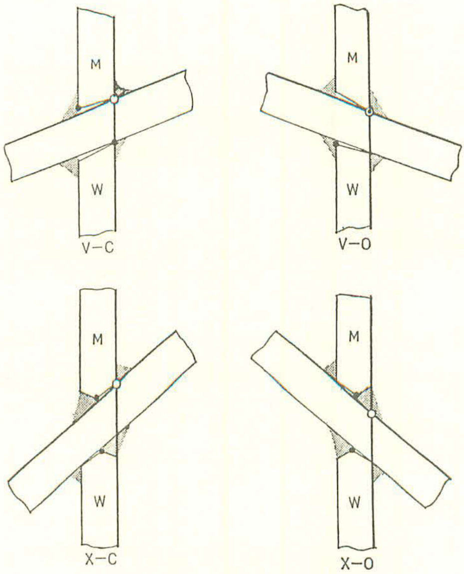


図 **4.13**　板材の貫通

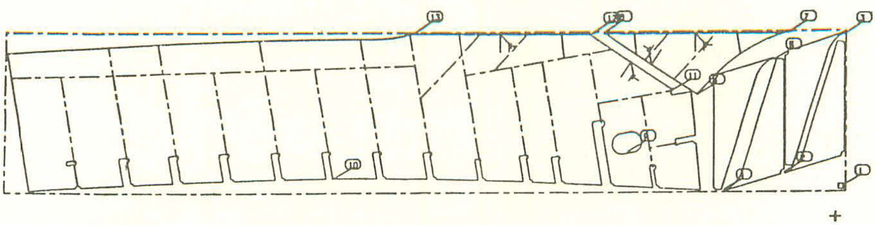


図 **4.14**　Nesting Plan

すための Nesting Plan (図 4.14)，切り出し後の残材が大きければそれを小物用材料として管理する残材管理も重要な役割である[2)]．

船体構造がある程度固まると，これに並行して艤装品の配置を確定し，取付部の補強，機器間の配管・配線の計画が行われる．配置に無理が生じた場合，船体構造の修正が必要となる場合もある．艤装品機器の要目仕様も同時に決められ，発注が行われる．

詳細設計の段階で決められる部品数は，自社工場内で製作するもの，外部発注を行うもの合わせて 30 万～50 万点程度となる．

(d) 建　　造

生産設計から出図された部品は直ちに工場に送られ，建造工程に入る．船体構造の大部分は自社工場内の製造で，板材の切り出し，小組立，大組立の過程を経てひとまとまりのブロックにまとめられる．この段階で大物のパイプ類，艤装品もアセンブルされる．ブロック段階でできるだけ艤装を進めておけば，進水後の搬入工事が少なくなるため，できる限り早期に艤装工事に着手する努力がなされている．

ブロックが完成すると，船台あるいは建造ドック内でブロック搭載が行われ，船としての姿にまとめられる．搭載工事が終わると，船を進水させ，岸壁に係留した状態で残された艤装工事が行われる．

4.3.2 設計上の問題点

前節で述べた現在の造船設計上の問題点は図 4.15 のようにまとめられる．問題を発生させる要因はそのまま造船設計の特徴であり，下記の 3 点に要約できる．

(1) 個別設計であること

(2) 大規模製品であること

(3) 比較的短納期であること

これらの条件は造船設計にとっては与件であり，容易に変更できるものではない．大規模で部品点数が多いことは船そのものの特徴であり，個別設計であることも，年間建造隻数が世界全体で 1000 隻程度であり，大手造船所でも数十隻に止まる以上避けられない．同型船がつくられることもあるが，たかだか 10 隻程度である．船の建造コストに占める設計の費用は 3~5% 程度であり，現状では同型船建造によるコスト減はそれほど高い評価とはならない．

納期が短いことは必ずしも絶対条件ではないが，短納期であることは企業としての重要な競争条件の 1 つである．計画・設計にはじまり，外注手配を含め完工までの期間はおよそ 1 年あまりである．この納期に間に合わせるためには，詳細設計に入る前に一部の機器，鋼材等の発注が行われ，またすべての設計が完了する前に一部部品の加工が開始される．

短納期で多くの仕事をこなすためには，多数の設計スタッフを必要とする．

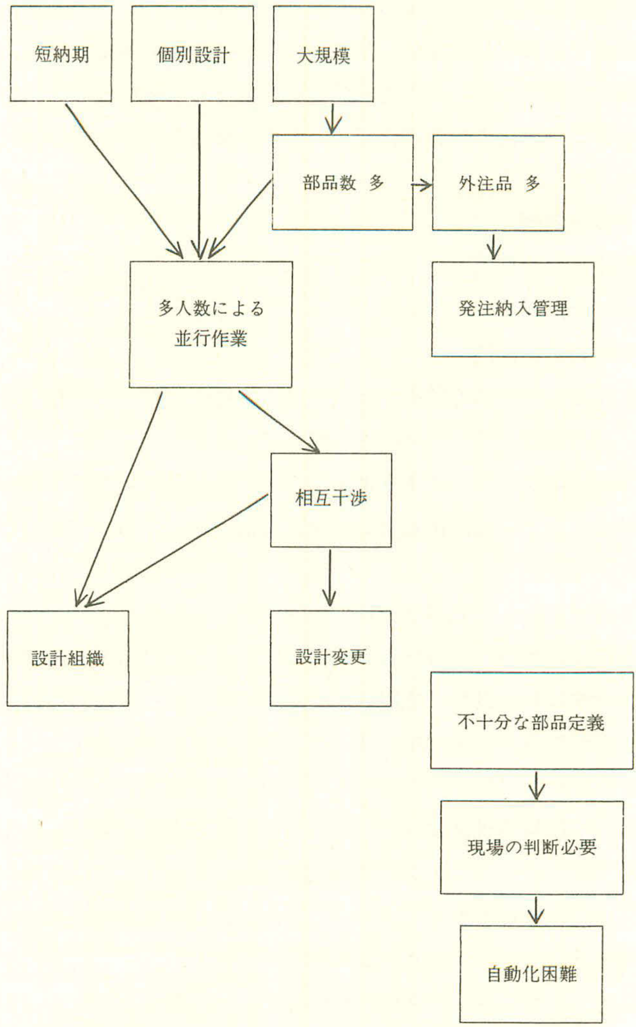


図 4.15 造船設計上の問題点

年間 30 隻程度の建造量に対し，基本計画から生産設計までの間，設計と名のつく部門に配置されているスタッフは，およそ 1000 名程度にのぼる．1 隻あたりに直せば，ある船の設計に関与する人間は 100 名程度となる．

多数の人間を投入し，効率よく，しかも設計思想を一貫させながら並行的に作業を進めることは容易でない．特に設計という創造的作業において，さまざまな考え方をもった人間が，首尾一貫した作業を行うということは奇跡に近い．

設計組織は，専門技術分野別に下記のように分けられている．

(1) 性能部門

(2) 船殻設計部門

(3) 船体艤装設計部門

(4) 機関設計部門

(5) 電気艤装設計部門

基本設計段階での流体力学的性能を担当する性能部門以外の部門は，基本計画から生産設計に至るすべての段階に関連している．

これら各部門が並行的に作業を進めると，当然多くの相互干渉を起こす．これらの干渉の調整が各部門担当者の重要な役割であり，身を削るような打合せ会議の連続となる．

相互干渉の中で最も代表的な分野は配管である．船殻設計により空間配置が固まってくると，機器の据付位置が決められ，つぎに具体的な配管計画がはじまる．配管計画は船体艤装，機関設計両部門で行われ，各部門の中ではさらに分野別の小部門に分かれて分担作業が行われる．これらのグループが限られた空間の中でいっせいに配管計画を行えば，相互干渉が起きるのは当然である．基本設計段階で配管系統図は作成されているので，干渉が発生しそうな場所は経験により判断できるが，細かい点は実際の寸法をもった図面を書いてみなければわからない．図面を書いてみても干渉が発見できず，現場の作業に移ってはじめて発見されるようなこともないわけではない．

干渉が発見された場合，部門間の打合せにより調整することになるが，調整により譲る側に回されると，それまで苦労を重ねて書いた図面を書き直さなければならないため，必死の防衛努力を行うことになる．総じて先手必勝の陣取り争いになる場合が多い．少しずつ譲り合い，何とかおさまる場合はまだしも，どうしてもおさまらなくなると機器の据付位置の変更，極端な場合船体構造そのものの変更が必要となる．これもデザイン・スパイラルの1つとして受け入れるには，スパイラルの一周があまりにも消耗的であり，しかも創造性の薄い

作業である.

現在使われているCAD配管システムは，作図という意味では非常に役立っている．不毛のデザイン・スパイラル周回のスピードアップにはきわめて有力である．しかし，完全な干渉チェックを行い，干渉回避を簡単なコマンドで実行できるようにするには相当な努力を追加しなければならない.

納期に追われると細部にわたる部品定義が十分でないままに製造に移らざるをえない場合も起きる．現実に，ある口径以下のパイプについては，系統図のみを現場に流して工作するという作業標準をもつ造船所もある．個別注文生産の製品の場合，設計でどこまで詰めなければならないか，現場の判断に依存してもよいように現場の能力を高めておくかは，ある程度まではトレード・オフの関係にある.

かつて，船といえば一般貨物船であり，船というイメージが固定していた時代は，図面がほとんど用意されなくても船の建造が進み，つくりながら承認用の図面を作成し，実際の船とその設計図が同時に出来上がるというようなこともあった．現在では専用船化が進み，船の内容がますます多様化しつつあって，設計に要求される詰めのレベルは厳しくなりつつある.

工場の自動化を促進しようとするならば，現在「あとはよろしく」と現場の判断に委ねている部分を設計段階で十分に定義しなければならない.「A点からB点まで，干渉を避けながら配管せよ」というコマンドを実行しうる知能ロボットをつくる努力をするよりも，CADシステムの中に完全な幾何モデルを構築し，そこで定義された部品を精度よく製作して，ピタリとはまるような組立て工程をつくるほうがはるかに合理的である.

船には外注部品が多い．大は主機関，発電機から，小は居室の中の家具調度，食器に至るまで多岐にわたっている．これら個々の外注品の多くは注文生産であり，仕様決定，設計承認，納入管理，原価管理など設計部門の負担となる作業が多い．日進月歩の先端技術を応用し，全く新しい概念の部品が開発されているかも知れないし，適切な刺激を与えることによって開発が促進される場合もある．技術情報に関する感度の良いアンテナをもち，何か使えるものはないか，あるいは逆に何か提供できるものはないかと注視していなければならない．これらの要件を満たす外注管理システムを構築するための基盤は，情報化シス

テム高度化の中で急速に整いつつある．

外に向けている眼を内に向け，現在内部製作を行っている部門を分散システム化させる方法も考える必要がある．相互に信頼のおける分散システムが，相互補完的に作用し合うことによって大規模かつ複雑なシステムを製作できるようになるとすれば理想的である．

4.4 個別生産品の設計

4.4.1 多様化の時代

情報化社会，あるいは多様化の時代という言葉がよく話題となる．物的な生活面でとらえるならば，不足の時代を克服し，充足あるいは過剰の状態を意味している．不足の時代においては「身体を服に合せる」状態であったものが，「身体に合わせて服を選ぶ」状態となり，さらに「趣味に合わせて，あるいは個人のアイデンティティを求めて服を創る」状態にたとえられる．趣味に合わせた服は，それに合わせたアクセサリー，靴，ハンドバッグ等々のコーディネーションへの要求として発展する．これら情報の連鎖が意識的に，あるいは無意識のうちにかけ回る社会が情報化社会である．

設計・製造技術はこのような社会変化にどのように対応するのであろうか．「身体を服に合わせる」時代においては，とにもかくにも量を供給することが第一義的であった．量的供給を満たすため，規格化された流れ作業による大量生産システムがつくられる．「身体に合わせて服を選ぶ」時代に入ると，L, M, Sというサイズによる層別，ついでやせ型，肥満型というプロポーションによる層別が導入される．次第に細分化される各層の製品を大量生産化するため，初歩的なFMS化がはじまる．大量生産システムから独立させやすい，ズボン丈，袖丈のような個所はフリーサイズとし，個々の顧客の体型に合わせる．色柄は生産システムによらず自由に選択できる．このようにして選択の幅は広がり，街の中を歩いていて，自分と同じ服を着ている人を発見することはほとんどないほどになった．

「趣味に合わせて創る」時代も着実に進みつつある．現在のところ，デザイナが自己の主張として少数のロットをつくり，それを顧客が選ぶ段階であるが，

表 4.4　大量生産と個別生産の相違

		大量生産	個別生産
設計		時間・費用ともに十分 投入できる. 細部まで設定が及ぶ.	時間・費用の投入に制約 がある. 細部までは及びにくい.
部品調達	専用部品	大量生産可能	注文生産
	汎用部品	相違点なし	
製造		作業の細分化 単純作業 流れ作業 自動化容易	作業を細分化できない 判断を要する 手作業が多い 自動化困難

このような製品は製品そのものというより，その製品のもつ情報がより多くの意味をもっている．自分に似合うかどうかをテストするために実体としての服が必要なのであって，テストする方法さえあれば，デザインのみで十分である．

層別化の究極は個別化である．層別化は製品を安価かつ大量に供給するための条件として行われてきた．情報化時代が層別から個別への脱皮を要求するとすれば，それを支える設計・製造技術にも大きな変化が要求される．

現段階における大量生産システムと個別生産システムの相異点を表 4.4 にまとめた．設計段階における相異は，一言でいえば「設計の詰めのレベル」であろう．大量生産では，ごく部分的な設計の変更も，生産量が大きいため，全体としての成果に大きな影響を与える．自動車生産においては，1 台あたり 30 円程度の設計変更に神経をとがらせるが，船の場合，詳細設計段階で注意するレベルは 100 万円のオーダーである．大きな差のように見えるのがわずか 3 万倍であり，その設計が関連する生産台数の比ではない．設計に投入する資源の量がトータルコストとのトレードオフとなるのは当然であろう．

使用する部品のうち，汎用のものについては相異点がないのは当然である．製品固有の専用部品についても，大量生産品の部品はやはり大量生産の性格をもちうるが，個別生産品の部品は，ある程度の規格化はできるにしても注文生産の場合が多く，個別生産品の色彩を強くもつ．

大量生産品と個別生産品の製造プロセスは全く異なる．大量生産では，作業

を細かいプロセスに分化させ，個々の作業を単純化している．生産設備に資本を投入してもその個々の製品にかかるオーバーヘッドはきわめて小さい．個別生産においては，設計段階において細かい点まで製造法が定義されていない場合もあり，製造段階において判断を要求されることもある．

情報化時代は層別化から個別化への脱皮であるとすれば，設計・製造面から見れば大量生産システムから個別生産システムへの移行である．しかも，実質的な生産量は拡大の方向でなければならない．個々の製品の市場により，要求されるレベルは異なるものの，大量生産システムの「生産力と効率」を維持しながら個別生産が可能な体制が要求されることになる．

4.4.2 設計のツール

設計とは図 4.16 に示すように，要求機能を整理し，それを満足する実体の上での概念を仮定し，その実体を要求機能と比較しながら評価し不満足な点を修正する繰返しによって，目的とする概念形成と製造法を定義する行為である．この繰返しがデザイン・スパイラルと呼ばれている．ある機能を実現しうる実体は多数あり，逆にある実体は複数の機能をもつ．したがって，機能と実体が 1：1 に対応することは稀であり，実体を仮定しなければ評価ができない．

個別生産品の設計の詰めが，大量生産品の設計のレベルまでに至らないのは，時間的・費用的制約によるものであると述べた．機能設計の段階でデザイン・スパイラルを繰り返すのは創造的行為であり，楽しみですらある．しかし，設計が詳細部分に入り空間配置が主役を占める段階になると，デザイン・スパイラルを一周するために要する時間と労力は相当のものになる．設計の出力が，

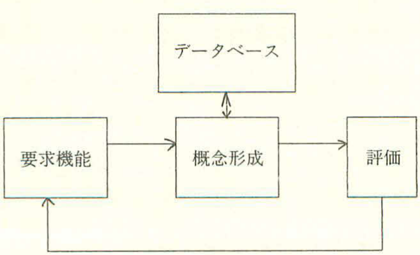


図 4.16 設計のプロセス（デザイン・スパイラル）

設計図であり，設計図が各要素の幾何形状を表現するものである以上，設計の一部変更は関連する図面の書き直しを意味する．

CAD システムが Computer Aided Drafting システムにすぎないと悪口をいわれながらも使われてきたのは，デザイン・スパイラル上の回転速度上昇に相当の効果があったためと考えられる．

設計における時間的費用的制約を解放する環境が急速に整いつつある．製造面においても FMS がさらに進めば，大量生産と個別生産の壁が次第にとりはらわれる可能性がある．これらの環境が整えば，設計製造システムの情報化時代への対応ができたということになる．

設計環境の整備上期待されるものに，

(1) 3次元ソリッド・モデリング

(2) エキスパート・システム

(3) プリゼンテーション技術

(4) データベースの高度化

(5) 通信環境の高度化

などがあげられる．

初期の CAD システムが，製図技術の機械化である2次元のシステムから，3次元のワイヤフレーム，サーフェス・モデル，さらにソリッド・モデルへと進みつつある．ワイヤフレーム・モデルでは，ワイヤフレームを形成する個々のワイヤが設計対象の一部をなしていることを示しているのみで，たとえばワイヤフレームをある平面で切断したときに得られる点列相互間の意味はもっていない．サーフェス・モデルも同様に，切断線は得られるが，その線以外の情報はもっていない．

完全な情報をもたせるためには，ソリッド・モデルが必要であるが，実用システムへのこの手法の応用は現在のところ限定されている．その理由は単純に，システムのパフォーマンス上の問題であり，計算機の高度化をまたなければならない．

用途を限定すれば，限定したモデリング技術でパフォーマンスの良い設計システムをつくることができる．基本的に骨と皮で形成されている船の構造は，概念的にはサーフェス・モデルで十分表現できる．しかし，重量集計のために

は板厚情報を追加しなければならず，工作上の鋼板端部処理の指定にはソリッドモデルに限りなく近い表現が必要となる．このような例外処理が多く使われたシステムを用途別にもてば，全体としてきわめて柔軟性のないものとなり，メインテナンスに手間のかかる発展性のないシステムになる．

エキスパート・システム[3]として実用化されているもののほとんどは，現在のところプロダクション・システムである．プロダクション・システムはif……then……という形のプロダクション・ルールの集合を知識ベースとしてもち，それと独立した推論エンジンがシステムの現状とプロダクション・ルールの内容を照合しながら推論を行う．if……then……という論理の展開は，従来の手続型プログラムでもよく使われるものであるが，手続型プログラムの中では知識と推論が一体となっているのに対し，プロダクション・システムではこれを分離し，独立して扱える点に特徴がある．プログラムすなわち推論エンジンに手を加えることなく，プロダクション・ルールを独立にメインテナンスできる効果はシステムが複雑になるほど大きくなる．

プロダクション・システムの実用例には故障診断に類するものが多く，設計への応用について疑問視する向きもある．しかし，設計を概念形成とその評価という2つの局面に分けて見れば，評価面は故障診断にほかならない[4]．部下が書いた図面に対して行う上司のコメントを整理すればそのままプロダクション・ルールになるはずである．概念形成にプロダクション・システムが応用できないとはいえないが，無限の可能性をもつ概念形成の場に，もし……ならばという，数えあげを前提としたプロダクション・システムに多くを期待することは本質的に無理であろう．

本質的意味の概念形成は無理としても，設計のための既存の概念をシステム化することは有益である．幾何モデルしかもたないCADシステムは，白紙の状態からはじめなければならない．船とはこういうもの，飛行機とはこういうものという概念を少しでももったシステムがあれば，設計者にとって有力なアシスタントとなるであろう．フレーム表現，オブジェクト指向プログラミング等の手法は，このような意味で将来のCADシステムの有力な手がかりである．

機能設計段階での概念形成は人間の知的好奇心を刺激する作業であり，それほどシステム化を図る必要はない．詳細設計段階では比較的定型的で，労力を

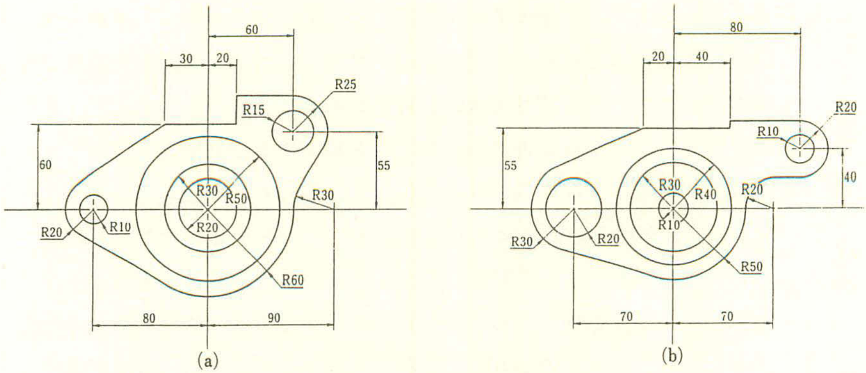


図 4.17 幾何学的推論システム（パラメトリック・デザイン）

要する作業が多い.「……は……に倣って行え」とか,「……の寸法変更に伴い必要な部分の修正を行え」など，人間の部下に頼むとすれば，極力繰返しをはばかる作業である．個別生産品の設計において，部品定義が完全なレベルまで行いにくいのもこの部分の労力が大きくなりすぎるためである．

木村文彦助教授らは「幾何学的推論システム」によりこのような作業に道を拓いている[5)]．これによれば，幾何学的拘束条件を指定することにより，図 4.17 に示すように寸法変更による形状変更が容易に実行できる．このような手法が一般化されれば，少なくとも機能概念の固まった製品の個別設計はきわめて自由になるものと期待できる．

3次元ソリッドモデリング，幾何学的推論システム等，数学的定義や操作が高度化しても，最終的判断を行う設計者，あるいはその製品を求めようとするユーザーにとって五感で判断できるものでなければならない．そのためには，システム内のモデルを視覚に訴えることができれば触覚にも訴えられるプリゼンテーション技術が重要である．少なくとも視覚に関する限り，3次元モデルをリアルタイムの動作まで含めて実現できるようになりつつある．

以上3点は，個々の設計者の能力を高める方向での環境整備であるが，複雑なシステムの設計は当然個人の能力を越えるため，共同作業が必然となる．この共同作業を進めるための設計組織を強化するためのシステムの高度化も必要である．

現在の CAD システムで幾何モデル格納のため使われているデータベースは，モデリング技術の場合と同じく，主としてパフォーマンス上の点から特殊で専用のものが使われている．実用 CAD システムの要求条件の 1 つとして，オペレータのコマンドに対するレスポンスタイムを短くすることが要求され，それが，モデリング技術，データベース技術に対する制約としてはね返っている．

CAD システムを使った設計は，設計概念としてのモデルを次第に詳細化しながら，1 つのファイルとして完成していくプロセスである．またそのファイルは，部品情報，工作情報，工程管理情報など，多くの他の性格の異なる情報とリンクしながら，製作に使われる．複数のスタッフによる共同作業で設計を行う場合，個々のスタッフに対し設計中のデータベースへのアクセス権をダイナミックに管理する必要があり，部品についてはその供給メーカーから設計情報の提供を受ける必要もある．

これらの要件を考えれば，設計用データベースは，基本的には汎用データベースを利用すべきである．NASA による航空機設計システム開発プロジェクト IPAD においても，その最重点項目としてリレーショナル・データベースの開発が取り上げられた．これは，巨大な分散型システムにおいて，共通に利用できる汎用データベース管理システムである．

通信環境の高度化も全く同じ理由で重要性が増す．設計チーム内での情報交換，部品提供者からの受信，製作部門への送信，これらの通信が，同一システム内のデータベース・アクセス，LAN，広域ネットワークを経由したアクセスなどさまざまな形で実現される．

4.4.3 将来の造船設計システム

前節で述べたように，造船設計は個別設計であること，大規模製品であること，比較的短納期であることという特徴をもち，その結果，多人数による並行作業によらざるをえないため，部門間あるいは設計スタッフ間の相互干渉が多く発生する．また設計と同時に多数の部品に対する発注納入管理が重要となる．部品の多くは注文生産品であり，その仕様決定作業には多くの設計的要素が存在する．

現状では細部にわたるまでの完全な部品定義を行うことは困難であり，現場

作業者のプラクティスによる判断に任されることも多い．納期を急ぐあまり，設計と製造が同時進行し，製造途中設計変更が入って不要部品の山を築くこともある．

近い将来われわれが手に入れることのできるであろうCADシステムの新しいツールによれば，これらの問題の多くを著しく改善することができるであろう．その改善の主役をなすものはエキスパート・システムであると考える．またそれを側面から支えるのが，3次元ソリッド・モデリングとプリゼンテーション技術である．

エキスパート・システムの導入により，仮に個々の設計スタッフの能力が10倍となるとすれば，現在100名を越える人員を投入して行っている設計が10名程度で可能となる．この数字は省力化という側面でとらえるべきではなく，「一貫した設計の実現」のための必要条件としてとらえるべきである．共同作業による設計を行うとき，設計スタッフ間の打合せは不可避である．打合せ会議において実質的な討論が行えるのはたかだか15名までであるという経験則から見て，設計スタッフの数を減らすことは想像以上に重要である．

幾何学的推論システムの考え方は，船のように概念的には固まっている製品に対してきわめて有力である．配管や配線の設計では，系統図という形でトポロジカルに作業を進められる部分が多いが，構造図においては，設計者の頭の中では同一のトポロジーをもちながら表現としては寸法をもたせなければならないものが多い．設計の各段階において，できるだけ深い段階までトポロジーによる定義，すなわち機械的拘束条件の定義を進め，その後に各部の寸法をパラメトリックに変えながら最適化するプロセスをつくることができる．

トポロジー定義は，船体，機関，艤装の各分野で比較的独立に行うことができる．相互干渉の大部分は空間配置の段階，すなわち寸法決定の場で生ずる．この段階で，3次元モデリング技術，プリゼンテーション技術を駆使できれば，きわめて良質な資料が用意された打合せを行うことが可能である．

相互干渉の調整が完全であれば，それをもとにした細部にわたる部品展開はほとんど問題なく実施できる．

部品定義を完全にすれば，それに従って加工し，組み立てる製造工程にも非常に大きな影響を与える．製造工程にimplicitな形での製品に対する理解を要

求すると，設計側はその理解を前提とした情報を出力することになり，設計と製造がワンセットにならなければその製品をつくれないという状態になる．現在の造船はまさにこの状態であり，個別注文生産である以上避けられないものと考えられている．設計と製造の完全な分離が可能となれば，製造工程選択の幅は広がり，自動化の可能性も格段に増える．われわれはいま，一方でフレキシブルな製造システムを実現しようとし，一方では強力な支援能力をもつCADシステムを手に入れようとしている．フレキシブルな製造システムといっても一ヵ所の工場で何でも加工できるシステムではなく，ある範囲の部品製作が，その部品の用途によることなく行えるシステムである．

これらの機能分散化されたシステムをネットワーキングして，垂直分業による個別生産システムをつくりあげるような体制づくりが，将来の造船設計システムの課題である．

4.5 おわりに

情報化社会における設計製造システムは，個々の製品によってそのレベルが異なるにしても，個別化の方向を本質的に指向する．自動車を買うとき，塗装のパターンを自分で考えたものにするよう注文するかもしれないし，極端な場合，エンジンを自分が設計したものと取り替えたいという人が出てくるかもしれない．このような多様な要求を，間違いなく，しかも現在の大量生産システムによる製造とあまり変わらない程度の効率で実現する設計製造システムが望まれる．

船は個別注文製品の代表例の1つである．現状では，設計面においても製造面においても多くの問題点をかかえている．しかし，上記のような情報化社会の中での設計製造システム環境の中では，船程度の製品の設計は1人でできても少しも不思議ではないように思える．逆に，船の設計を数人程度のチームで行えるようなCADシステムをつくることができれば，他の個別生産製品の設計にも応用できるはずである．応用できるということは，現在製品の数だけあるといわれる設計手法を抽象化できることを意味する．ここで述べている内容は，設計に使えるであろう新しいツールを使った，設計の手続論に過ぎず，設

計の本質である創造性については触れていない．しかし，設計という行為の抽象化が行われにくいのは，機能上の概念と空間配置での寸法上の概念のからみ合い，製造上のプラクティスが及ぼす設計上の制約など，手続論が複雑すぎるためとも考えられる．

このような観点から，「設計システムの設計」は非常に興味深い課題であり，船の設計は格好の例題であると考える．

参考文献

1) 造船テキスト研究会：商船設計の基礎，成山堂．
2) 泉洋一郎：船殻部材処理システム，造船におけるシステム技術，日本造船学会システム技術委員会．昭和 59 年秋．
3) F. Hayes-Roth : *Building Expert Systems,* Addison-Wesley, 1983.
4) 小山健夫：造船業における AI 応用，日本機械学会誌．Vol. 89, No. 815.
5) 木村文彦他：非単調論理に基づく幾何学的推論——寸法問題への適用，昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集．

5 建築設計

東京大学工学部建築学科教授　槇　文彦

5.1 はじめに

建築が工学の分野に属する限り，"設計"という行為を工学として見ることはもちろん可能である．しかし建築設計は明らかに工学を越えた行為であることも事実である．このように広義における建築の設計を，工学に限定することなく本質を明らかにすることが，とりもなおさず工学としての建築の設計が他の分野に対してもつ共通性と差異性を解明することになると思われる．

建築設計はおそらく他の工学の分野の設計と比較して一番わかりにくいものではないかと思う．というのは，たとえば私自身が設計を30年以上やっていて，いまだもって建築設計とはなにかということを，きわめて明快に合理的に説明することができないからである．

5.1.1 合理性と非合理性の共存

建築設計というのはなぜ一言でいえないかというと，1つにはつぎのような点がある．今回意匠を中心にした設計の総合化のプロセスという点を通して説明を試みたいと思うのだが，建築設計というのは部分部分を見てみるとかなり合理的な，あるいはシステマティックな設計が可能であるという事実がある．たとえばある強度を有して最もコスト的にも妥当な構造システムを，予条件をふまえてつくっていくこと，あるいは与えられた機能に対してオプティマムに

満足できるエア・コンディショニングのシステムを考えること，あるいは最も機能的な管理が行いうるオフィスの平面計画をつくるといった行為はかなり合理的につめていくことができる．また同時にその設計手段に使われるさまざまな知識もかなり集積されているし，技術者がそれらの知識と手段を使って答えを求めた場合に比較的リーズナブルな答えを出すことも可能である．こうした点に関しては現代の建築設計はかなり進んでいるといえよう．また合理化が押し進められている分野に関しては，つぎの発展をどう考えたらいいかということもかなりわかってきている．ただ問題なのは全体を総合して1つの建築物をつくるときに，その総合化のプロセスにおいて非常に多くのやり方が存在しているし，われわれはその中からどれをとったら一番いいかということに関して絶対的な手段をもたないのが現状である．むしろ現在はそうしたさまざまな設計のあり方をそのまま許容しながら21世紀に向かっていくという状況ではないかと思う．船舶の設計は非常に個別的であり，どちらかというと大型の設計である，それから比較的短期に行わなければいけないということがある．住宅を除くと，たとえばオフィス・ビルとか文化施設，都市施設など，建築の場合も船の設計と同じような様相をもっているといえる．ただし建設期間について見れば2ヵ月くらいしかかからないものから，3年，4年くらいのものに至るまでさまざまである．自動車とかテレビとか船などに比べて建築の場合はその設計が次第に少数のメーカーに集約されて，そこでノウハウが蓄積されるということが少なくて，相変わらず非常に多数の建築主体というか，個人で住宅を設計している人から，チームで大規模な建物をつくるものまでさまざまな設計のあり方が存在し，その間で互いに違った価値基準に従って設計が行われているというのが特徴である．したがってそこから生産される建築も千変万化である．しかもそれがいけないかというと，必ずしもそうはいえないというのが実は建築設計の面白いところであって，考えてみると世の中，全部同じ建物になってしまったらわれわれの社会環境がたいへん退屈なものになるのである．日本では自動車の種類もかなりヴァラエティがあるのでよいが，そうでないところでは自動車を見てもなにか面白味がない．私は最近インドのニューデリーに1週間ほど滞在することがあったが，現在インドでは自動車を自国生産する時期にきている．アンバサダーという4人乗りの比較的小型の車が生産されてお

り，ほとんど全部同じ型である．これはおそらく開発途上国の1つの段階で，やがて日本のようにヴァラエティが生まれてくると思うが，そこではまだ車が必需品の段階であり，個人の意思や欲望の反映としての変化は生まれてきていない．

建築についていうならば，私たち自身が質のいいものをたくさん，しかし同時にヴァラエティをもってつくるための設計手段というのは1つのシステムから生まれるのではなくて，やはり個人とか社会の要求などに相呼応しながらつくられていくという宿命をもっている．したがって，建築設計に従事する者にとってはさまざまな手段の中から選択するそのあり方も1つの問題になってくるわけである．

それからもう1つ難しい問題は，出来た建築に対する価値判断の問題がある．かつてローマ時代のヴィトルヴィウスという建築家が「建築は用と強と美を満足させなければいけない」といったこと自体は相変わらず今日でも真実であるが，これはあくまで一般論であり，問題はだれにとって美しく，だれにとって最も用をなしているかという点で具体的な答えはさまざまに変わってくるのである．たとえばシステム設計論の中でインテリジェント・ビルを例にとって，建築における情報機能のシステム化ということについて例が出されたが，いわゆるインテリジェント・ビルと称するものの中で，都市美という観点から見ると必ずしも視覚的にインテリジェントでないものも多い．つまり中は確かにインテリジェントかもしれないが，いかにも巨大な箱が置いてあるだけであって，見たところは少しもインテリジェントでないというケースがある．

5.1.2 建築評価の基準

したがって，建築における評価の基準も，少なくとも3つあるかもしれない．1つはユーザーそのものが評価する基準，2番目には社会全体が評価する基準，3番目には専門家の目から見た評価である．そういったいくつかの評価が全部同じであればいいが，困ったことにそれぞれ分かれる場合もまた非常に多い．たとえばユーザーが求めた建物の大きさや内容が社会の評価基準に照らしてみたとき必ずしもその周辺の近隣社会の要求と一致しないことは，都市の高密度化に伴ってますます多くなってきている．しかもそうした価値の衝突は，また

それぞれの地域集団内部にも存在し，必ずしも一致するものでもない．したがってある価値基準を突出させたり，あるいはさまざまな価値のオプティマイゼーションを行うことによって同じ与条件から全く異なった答えが生まれてくる．それから3番目の特徴としては，確かに建築も工学の1つであるということである．われわれの文明の発達に伴ってさまざまな分野で進歩していることは先に述べた．あるいはより効率化されている．たとえばきわめて大きな空間を無柱で覆うというような構造上の進歩は現代技術の所産である．最近はニューマティックス・ストラクチャーなどによっても快適な室内競技場ができるようになったが，これも昔の技術では全くできなかったものである．しかし一方において建築はたいへんクリティカリティ (criticality) が低いというか，少々古いものでも新しい要求に対応していくことができるという側面をもっている．ある1つの部分が少し古くなっても全体に与える影響度がわりあい少ない場合が多い．それはどういうことかというと，需要に対してかなり寿命が長いということである．たとえば兵器の歴史を見ると，たとえある1つの兵器がどんなに強力であっても，それを打ち破る，あるいはそれ以上のすぐれた兵器ができた場合に，すぐ廃絶の運命に追いやられる．あるいはどこかで部品に，あるいは材料に革命が起きてもシステムが非常に高いクリティカリティでできていればいるほど，全体に対する影響はきわめて大であり全く異なった全体が生まれてくる．そういうものに比べると建築は例外はあるが，多くの場合ルースにできている．したがってそういった点がまた古いものにもそれなりの価値があるだけでなく，こんどは逆に古いからこそ価値があるというケースが出てくる理由でもある．たとえば最近の建築保存運動などを見ていると，古いから残したいという社会的要求，あるいは社会的価値判断がそこに生まれてきており，ほかの生産物のように古くなったのはだめだというのではなく，十分に使うこともできるし，あるいは新しい価値が社会的なものとしてそこに新たに認められてくる．現在の東京駅あるいは赤坂離宮は東京大学建築学科の第1回の卒業生である辰野金吾氏が設計したものであるが，やはり日本の文化財の1つとして残されていくのである．そういう点が建築の設計を非常に難しく，また幅の広いものにしている点であると思う．

いま建築設計の特徴をいくつか取り上げてきたが，他の工学の分野と同様，

建築の設計の歴史もきわめて旧い．そして人類の文明とともにさまざまな様相が展開されてきた．歴史の上であらわれたいくつかの重要な設計課題は今日なお有効なものが多い．というのも技術の日進月歩にかかわらず，先に述べたように建築設計の方法は累積的である部分がきわめて多いからである．たとえば石造や木造の工法の中で，伝統的な手法は今日なお有効であるものが多い，という例を見てもわかるであろう．

したがってここでは，第1に歴史的に建築の設計を概括し，第2に，そこから今日，最も利用されている，あるいは可能性のある設計の方法をいくつかのモデルを通じて説明する．そして，最後にこれらのモデルを比較検討することによって，もう一度，“建築設計”とは何を意味するか，という問いに対してある程度の理解，できうれば総括的な理解が得られることを期待している．

建築設計の歴史の展開は地域社会によって異なる．日本には独自の歴史があることはいうまでもない．しかし設計行為の本質をより包括的に見るためには，ヨーロッパ文明を中心とした設計の歴史を見ていくことのほうが意義が深いと思われる．なぜなら，1つは現代建築を生んだ母胎としての近代文明，近代主義にいたる歴史がそこにあるからである．そこにはさまざまな思想，主義，アプローチの相克があり，そうした相克を通して，われわれがより明確に事の本質を理解しうるからである．しかし同時に職人の手仕事を中心に展開してきた日本独自の設計のあり方も，当然今日的諸問題を含んでいることは論をまたない．

5.2　経験としての建築設計

設計とは本来「知識」と「行為」をどのように結びつけるかという根元的な課題をめぐって展開される．プラトンによれば知識の概念は，学識と巧妙さという2つの側面をもっている．つまりこのとき建築をつくっていく過程において，「建築学」と「建築術」という2つの分野が存在することが明らかにされたといってよい．

本来建物は人々が必要に迫られて自らつくってきたものである．しかし，社寺建築，あるいは特殊な建築をつくるようになると，そこに建築をつくること

にのみ関わる特殊な職域，職業集団が発生することになる．たとえばエジプトの石造建築を見るとき，石を切り出すこと，切り出した石を運送すること，そしてそれらを組み立てていく過程において，さまざまな特殊な知識が生まれ，工法が進歩した．それらは当初職業秘密という形で，こうした職業にたずさわる家系の中で伝授されていった．文明の進歩が今日に比較して緩慢な時代では，そこに十分な時間も与えられ，また進歩のテンポというものも遅かったので，試行錯誤のプロセスの中から知恵として結晶化された経験的建築が主流をなした．もちろん後にギリシア・ローマの時代に見られるように，いわゆる建築学に属する知識には単に工学的なもののみならず，天文学，医学，美学にわたる広範な知識が次第に加えられていくことになる．

しかし重要なことは，こうした建築学もそして建築術も，ある種の建築にたずさわる人々の中で完全にインテグレイトされたものであり，いわゆる設計という行為を分離して行う集団のみが発生することはなかったという事実である．

日本における木造建築にたずさわる職人たちも，またヨーロッパ中世の社寺建築の中心的存在であった石工たちも，工匠として，上に述べたプロセスの中で主導権を握っていた．

5.3 “芸術”としての建築設計，芸術家としての建築家

前に用・強・美ということを述べたが，一方において建築の中でもより美的なことを問題にするという関心がつねに存在してきた．美の概念そのものは時代によって変わっていく．西洋でいうならばルネッサンスの時期になると，中世のころまでインテグレイトされていた設計と施工が2つに分かれてくる．ルネッサンスの時代は自我が非常にはっきりと表面に出てきた時代で，だれがやったか，だれが何をしたか，ということが独立した設計の行為として組み込まれてきた．そこでは古典や美学に通じそれに基づいて設計をする人間と，実際にものをつくる人間の作業の分離がはじまってくる．このことは近代の設計の先駆けになるわけであるが，やはりわれわれにとって大事な面をもっている．建築設計という行為が単につくられたものへの関心とともにだれが何をやったかということも意識されはじめるのである．すなわち，建築設計がそういう時

代的要求と一緒に変化していくのである．船の設計のほうのことはよく知らないが，私は戦前派で子供のときは非常に船に関心をもっていた．当時日本の軍艦の設計などは，かつての東京大学総長の平賀博士らが行っていたと思うが，だれだれが設計したということをたまに聞いたことがある．自動車の設計も古い時代にはだれが設計したということはあったが，最近はどちらかというと大きな組織の中で，よりアノニマスになってきている．そういうものに対して，建築にはそういった伝統がいまも強く生き続けているという事実も注目しなければならない．

ただ，古い時代の建築物の対象は大体宗教建築，およびそこから派生したきわめて限定された都市の建築物に限られていた．数は少ないが，中世以後になると市庁舎，図書館，病院とか大学とかが出現してくるが，それとともにいまいった専門家が生まれてきた．住宅のほうは相変わらず無名というか，棟梁的な存在がつくっていたという歴史がある．日本でいうならば，茶室において明らかに設計と施工の分離が見られる．したがって設計と施工が分離してくると，それは必ずしも，設計者が施工に関するすべてを習熟している必要はない．設計者はより自由な人間である．設計はそれまでの集団的行為から個人的な行為へと移行していくのである．

5.4 建築設計の専門化・組織化

しかし 18 世紀以降都市が次第に膨脹して，やがて大量の人間がそこへ集中してくる．それと同時に，都市社会そのものが近代の発展とともにいろいろな建築のタイプを必要とするに従って，またもう 1 つ新しい設計対象が生まれてくる．そこではそれまでにあった宗教建築を中心にした知識や美の問題を離れて，より専門的，世俗的，工学的な知識，およびそれを設計していく手段が問われてくるようになる．そうなってくると，こんどは単に長い時間かけて立派なものを少数の人間がつくっていればいいというのではなくて，組織による新しい設計に対しての十分な質の確保，と同時に量の確保が問題になる．これは，建築においても他の工学の分野と同じ関心と目的が生まれてきたものといってよい．この点に関しては歴史的発展をたどってくると，建築とその他の分野は

非常に類似しているところもあるし，また少し違っているところもある．たとえばルイ 14 世時代フランスにできた Royal Building Administration という組織は実はその先駆をなすものである．こういうところではじめて建築設計の中でプランニングとかエンジニアリング，つまり技術部門を担当するところや，管理を受け持つところが組織の中で分化されていく．ところがこんどは同時に，だれでも建築に興味ある人間を，それまで存在した職人・工匠を中心にしたギルド組織の中からだけではなく，より広い社会の層から人材を募るということになり，建築の教育組織の設立に対する関心が生まれてきて，やがて集団的な立場で組織によってものをつくっていく体制も次第に確立されていく．つまり，合理的な設計のあり方についての関心があらわれる．そしてそれは，量に対する質の確保という近代工学がめざした共通の目的の中に，建築設計というものがやがて組み込まれていく端緒を示すものとして重要である．こうした建築設計の専門化はその後，個人ベースによる，あるいは共同体による職能団体の発生を促す．さらに設計における工学的分野，すなわち構造や環境工学の分野においても同様な専門化，職業化を促すことになる．都市の巨大化は構築物の規模の増大，さまざまな建物のタイプを生じることにより，ますますそれらについて専門的な知識が要求されるようになる．そして量産化の必要性が特に住宅問題について要請されることによって，建築がはじめて大量生産の対象として，他の工業生産物と同様に認識されはじめる．合理的な設計のあり方がさらに強調される社会，経済的基盤が醸成されていくのが近代である．

そういう状況が近世から近代にかけてますます多くなり，それに対応して設計をする組織が生まれてきた．もしも仮に建築がそれぞれの新しいタイプをつくるにあたって，先ほど述べたようにある 1 つの価値基準に従ってやっていけばいいということであったならば，設計・施工の組織も簡略化・集約化されたと思うが，先に述べたようにほかの工学の生産分野に比べてその設計建設主体が一元的に集約されることなく，むしろ拡散化している現状である．現在の日本の建設業の数を考えてみても，自動車とか電子工業に比べれば圧倒的に多い．それは他の国においても同様かもしれないが，1 つには目的とする建築の規模・種類が多いからであり，それはまたさまざまな物的環境の中でつくっていかなければならないという特殊性に根ざしている．

ただ一言つけ加えておかなければならないことは，現在日本の建築業のトップ・グループに属するところは，おそらく建築技術の水準という点ではまずいまや世界のトップに近いのではないかと思われるということである．ほかの工業分野と違って，建築技術の輸出というようなことは，製造業における製品のように簡単に行われ難いので，他の国に対して影響を与えるところはまだ少ないが，現在日本の建築技術のトップクラスはテクノロジーとクラフツマンシップと両方兼ね備えている強みがそのまま発揮されている．同時に建設省とか，メーカー，建築業の研究所がもっているノウハウは非常に高い水準で集積されている．この点に関しては合理的設計そのもののあり方も絶えず更新され，高い水準に達しているといえる．ところがそのノウハウがそのままストレートに設計に出てこれない状況にあることを先ほど述べたが，その中で設計をする側に立った場合，現在どういうようなことが問題になっているかということについてつぎに述べてみたい．

5.5 思想家としての建築家の登場，イデオロギーとしての建築

近代化，工業化は一方において都市を中心とする物的・社会的環境の悪化を招くことになる．そして，建築・都市の意味，価値をいっそう広いパースペクティヴの中で位置づけようとする態度が建築家たちの中に生じるようになる．そこでは，単に施主の要請に従って建築をつくり出すだけではなく，ときにそれを包容するようなイデオロギーの確立が提唱され，それに基づく建築設計の理念が展開されることになる．別な言葉でいうならば，地域社会，ときにそれを越えた国際的視野の中で，都市・建築が問題にされはじめるということであり，また建築を広義の「文化」の中で位置づけようとする意図のあらわれでもある．この方向は建築設計の範囲とその意義をさらに拡大化し，一方また拡散化することになる．すなわちそれは社会価値の多様化に伴って，それぞれの建築家，建築集団が建築に対して設定する目的・価値の評価の基準もまた多様化するということにほかならない．確信に基づく建築のあり方が問われると同時に，創造性も高く評価されるようになる．

たとえば，19 世紀の終りごろになると，人類とその社会の将来は高度な工

業技術の駆使によって無限に進歩しうるという進歩主義思想が生まれ，テクノロジーに基づく建築のユートピアを描くようになる．また一方，工業化社会の問題を直視するものは，regressive utopia として，旧い時代への復帰を唱え，あるいはヒューマニズムの建築，そして田園都市，さらには住民参加の設計のあり方にいたるまで，もう 1 つの新しい価値基準に基づく建築の流れをつくっていく．

その背景の 1 つは近代の工業化が都市の中で発展するに従って，19 世紀の終りころからたいへん粗悪な住宅や，環境を阻害するような建築ができてきた．それとともにこんなことではいけないのではないか，建築の設計というのは本来こういうことを目的とすべきではないか，という声が非常に高くなってきたのである．

それを受けて建築設計を行う者はどういう反応を示したかというと，それならばたとえば市民のための設計はどうであるべきかということが 1 つある．あるいは都市全体の環境も含めた建築の設計のあり方はないだろうかという考え方も出現してきた．ところが一方においては，現代の工業化社会はますます進展するから，むしろさらに先鋭化した設計のあり方があるのではないかという立場も登場する．つまり，個人とか集団がある特定の建築に関する哲学をもって登場してくることになる．さらには設計主体も単にユーザーの向う側にいるのだけでなく，自分たちでつくろうという立場も生まれてくる．たとえば「セルフエード」，あるいは「住民参加」という形の設計方法も今日出てきている．コーポラティブ・ハウジングと称されるものでは，5 人くらいの家族が一緒になって，ある土地を購入してその上に建てる場合に，それぞれ自分の住みたいアパートの間取りを決めて，それを専門家と一緒にうまく 1 つの建物に総合化していく．そうなってくると設計のあり方というプロセスの中で，いま述べたユーザーがさらに積極的に参加してくるというケースも出てきている．

5.6 建築設計の客観化，体系化

上に述べたように現代における建築設計の目的，方法，そしてその結果は多岐にわたりつつある．その中で 1960 年ごろより世界的にこうしたさまざまな

設計行為を客観的にとらえ，できうれば体系的に設計方法が確立できないかという関心が強まってきた．この関心は建築における「術」の問題をいっそう「学」としてとらえられないかという意図に基づくとも解釈されよう．つまり「術」に存在する神秘性のベールをとり払うという行為でもある．現在，さまざまな研究活動が日本でも建築学会を中心として活発に行われつつある．いま，こうした一連の研究の中に2つの段階を見いだすことができる[1)]．

その第1段階は，建築設計のあり方を他の工学の領域の設計との関係においてより合理的に設定しえないかという設問から出発している．1960年代には，超高層建築をはじめ，建築設計では解決しえない未知の問題がつぎつぎにあらわれてきた．その中で，さまざまな分野の人々が協働して，新たなヴァリエーションの可能性を探ることをめざして設計の本質を問うアプローチがはじまった．しかし，結果的には狭い意味での合理主義になってしまったところがある．現在展開されている第2の段階は，この当初の問題意識への接近を図ろうとするものである．すなわち建築設計の目的がここでは広義における「よりよきさまざまな行為空間」を総合的に獲得する手段として選ばれる．

たとえば，工業化住宅などを対象にとってみると，そのアプローチは建築固有のものでなく，自動車，鉄道車両の設計と共通した点も多く見られる．建築の設計行為を他の工業デザインと比較したとき，理念的には基本的な差はないという観点からその設計の論理的性質を問題にするならば，その研究手法としてオペレーショナル・リサーチやシステム・エンジニアリングといったアプローチが適用されうることになる．また，理論としては，集合論，グラフ理論，情報理論，人間行為の心理的モデルなども適用されうるのである．

しかし，第2の段階として，他の領域との共通性と一般性を確認していくことと並行して，やがてその差異性をも認めていく立場が明らかになってくる．特に設計者あるいは設計集団が目標とする建築空間をどのように評価するかによって，設計プロセスそのものが変わってくることが認識されるようになった．設計プロセスとは問題を解くだけでなく発見するプロセスをも含むのであり，通常の solution-oriented process と異なる様相を帯びてくる．ここでは設計方法の中に設計主体の問題そのものが関わりあってくるのである[2)]．つまり設計プロセスにおいても，標準的なパターンが見えにくくなってしまった現代社会

において，状況に応じて柔軟な設計プロセスを展開し，新しいテーマや世界観を表現していく設計主体のあり方が問われてくる．H. Rittel によれば今日のデザインの問題は，「意地悪な問題」(wicked problem) であり，つぎのような特徴をもつといわれる[3)]．

⑴ 明確な定式化をもたない．

⑵ 問題の定式化は解の定式化に対応している．

⑶ 終了規則をもたない．

⑷ 解について正しいか誤っているかはいえない．優れているか劣っているかがいえるに過ぎない．

⑸ 問題を解く手続の完全リストはありえない．

⑹ 問題についてはいくつも説明が可能で，その選択は世界観に依存し，同時に解を決定づける．

⑺ すべての問題は高次の別の問題のあらわれである．

⑻ 問題も解も決定的な検証手段をもたない．

⑼ すべて一度きりのもので試行錯誤の余地はない．

⑽ すべての問題はユニークである．

⑾ しかし責任はとらなければならない．

すでに述べたように建築設計はその長い歴史的発展の中で，当初は経験的なものの集積の上に成立したさまざまな方法の上に展開され，そこでは設計と生産行為の完全な統合が見られた．さらにこの 2 つの行為が分離し美を対象とした芸術的側面が強調されるようになる．やがてこうした主観に基づく設計のあり方と並んで，設計・生産の過程の中で専門化が進み，質のコントロールを合理的に行い社会的責任を果たすという面に重きがおかれるようになると，設計行為そのものが専門的なものと見なされるようになる．さらに 20 世紀以降，思想としての建築が重要視されるようになるとともにイデオロギーを明確にした設計態度，その結果としてのデザインに高い評価が与えられるようになる．一方，建築の領域では他の分野との接触により，いっそう合理的な設計のあり方に対する関心が増大するとともに，こうした設計のあり方をより客観的にとらえることによって，設計の本質に迫ろうとする研究が進む．しかし興味のあることは，建築を含む広義のデザインという行為が内包する非合理的な面を

H. Rittel が「意地悪な問題」という形で説明しているように，建築設計の本質に関わるユニークな問題がそこに所在することが次第に明らかになってきた点にある．

こうした歴史的な展望の上に立って，「建築設計とは何か」についてつぎの立場を明らかにしておきたい．

第 1 に，これは 1960 年以降の設計方法へのアプローチに見られた設計プロセスをいっそう客観的に見ようとする傾向の説明にその目的があるのではなく，むしろ現在，われわれの社会の中で毎日のように無数に展開されているさまざまなデザイン行為の中でどのような設計態度とプロセスが(これもさまざまな評価基準はあろうが)，結果的に高い評価を得ているかを，いくつかのモデルとその範例によって説明しようとするものである．

H. Rittel も述べているようにデザインの問題は終了規則をもたず，しかも 1 回限りで，建物をもう一度つくりなおすということが許されない以上，「果してこのデザインはどうすればより優れたものになりえたか」という形の検証が困難である．またデザイン行為が無数に存在するが故に，むしろすでに終了している多くのデザイン行為から何が有効なプロセスのモデルであるかを問うことも必要であろう．

つぎに，このあと示す 3 つのモデルは必ずそれ自体，完全に 1 つ 1 つが閉じたものではありえないということであり，むしろ 1 つの設計のプロセスの中で 3 つのモデルが状況に応じて部分的にあらわれることも十分にありうるということである．すなわち，設計主体の中で，柔軟にさまざまなモデルが使用されることはむしろよい結果，より優れた結果を生むこともあるということである．したがってこうしたモデルそれ自体の限定的有効性と，他のモデルとの関連性を明らかにしていくことが必要であることを強調しておきたい．ということは特に建築設計において，そのプロセスは必ずしも合理的所産に基づくものでないということでもあろう．重要なことは全体像の理解であり，その絶え間なき部分，断面，局面へのフィードバックにある．すなわち，あくまで全体像をつかむためのモデル化であり，モデルの純粋性を問題にするのではない．つまり設計行為の当初から最後まで他のモデルと全く違った形でプロセスを遂行しようというものではない．むしろ，モデルはある部分についての有効なモデルで

ある．実際の設計のプロセスの中ではこうしたいくつかのモデルがさまざまな形で存在しながら，最終的に設計行為を完結している場合が多いのではないかと思う．私たち建築設計をやっている者にとって大事なことは，1つのモデルに執着することもいいかもしれないが，同時に他のモデルの存在を気にしながら絶えず全体像を認識して，自分のモデルのもっている長所短所を絶えず認識していくことであり，そうした反省をもとにまた新しいよりよい方法を展開していくという態度が今後の設計行為の中核をなしているのではないかというように考える．

5.7　3つのモデル

設計は多くの場合，「分析 - 総合 - 評価」というプロセスに基づいて提案されている(図5.1)．そのプロセスは必ずしも合理的所産に基づくことではなくて，先にも述べたように大事なことは全体像への理解であり，絶え間なき部分，断面，局面へのフィードバックが必要だということである．しかも現実のデザインにおいて，限られた時間の中で完全に納得いくまでこれらのフィードバックを行うことはありえない．

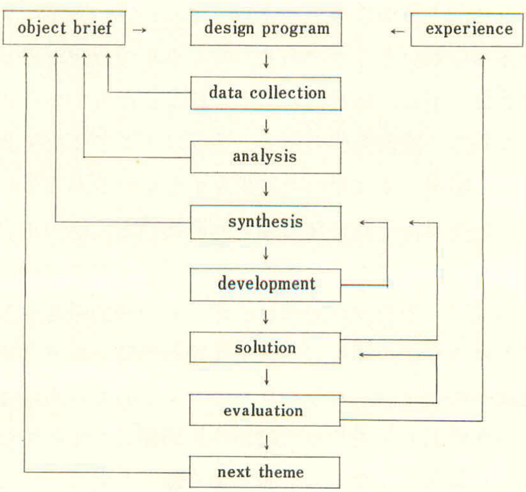


図5.1

さらに先ほど述べた評価というところで，設計者自身の評価，ユーザーの評価，あるいはユーザーが見えないときは，たとえば大量生産住宅だと，需要層を対象にした評価をアンケート調査，あるいは推論によってより広義の社会的評価も入ってくる場合がある．この中でH. Rittelがいった「1回限り」というのは，建築の設計も船の設計と同じで，いっぺん実設計に入っていくと，繰返しはコストがかかるのでよほどのことがない限り何回ものフィードバックは難しい．ただ大量住宅生産のようなものだと一応テスト的なものを原寸でつくるので，そこら辺までのフィードバックは可能であるが，一般的な建築物の場合フィードバックが可能なのはせいぜい基本設計の完了までである．あとは設計変更という形でしか行えない．とすると，基本設計の終わったところでユーザーあるいは設計者の間の評価のやりとりがあって，そこでもういっぺんもとに戻ってやり直しということでもある．あるいは時間がなければ，そこでおしまいということになっていく．先ほど船と同じで非常に短期的であるといったのは，そういった時間的制約をはらみながらやらなければならないのが設計行為だということである．

さて，建築設計のプロセスは非常に膨大になるので，このチャートの中で私自身が特に焦点を合わせたいのはanalysisからsynthesisの間の段階である．design program→data collection→analysisの段階は，いろいろなdata analysisの方法などを使ってやることができるし，またsynthesisのあとのdevelopment→solutionに至る領域も，まだいろいろな問題を含んではいるが，一応ある全体像が浮かぶと，あとは部分をどうしたらいいかということは比較的合理的な手段で詰めていくことが可能であるので，フォローしやすい．その段階での作業についてはCADあるいはコンピュータ・グラフィックスを動員することも可能である．このようにいろいろな点で合理化できているのは，前段階と後段階ではないかと思うので，いちばん建築設計で難解な部分は相変わらずanalysisからsynthesisの間にあるといっていいのではないかと思う．ここでは設計主体がどのようなテーマを設計の前提におくかということと，それからさまざまな前提をおいてはみたもののどうやって総合化へもっていくかということが問題であり，この辺のところで建築の設計そのものに不思議な曖昧さが存在すると同時に，われわれ設計をする者にとってはいちばんロマンをかきた

てられるところでもある．

建築設計はこの部分において精密/曖昧，システム/カオス，数学的/想像的，といういろいろな対立的な概念を一挙に結びつけるプロセスが要求される．そこではコンピュータとかシステム・アプローチがなかなか効かない．むしろ人間の頭脳の中にいろいろなインフォメーションが入っていて，それがあるパターン認識みたいな形で突然出てくるということではないかと思う．すなわち設計とは多様な相克する情報を操作し，実体化することのできる高度に組織化された精神的なプロセスであるといわれるゆえんがここに存在する．

5.7.1　モデルⅠ：Issue-oriented Model

建築設計の多くは，目的とする行為空間を，要求されるさまざまな機能的諸条件を満たしながら，与えられた場所と求められる上限コスト内におさめることが最も一般的なフレームワークをなす．建築は，きわめてクリティカリティの高い精密機械や飛行機等の工学製品と異なって，クリティカリティが低いところに特徴がある．すなわち上に述べたような条件をオプティマムに満足するためには，後に述べる量産工業化住宅のように高い商品性が要求される場合を除けば，それを達成しうる形態は決して1つではなく，いくつもある．つまり形態 - 機能空間の間のクリティカリティは低い．同様に同じ形態，たとえば10 m×30 m×15 mの箱に付与される表象形式もまた無数に存在する．そして多くの場合，オプティマムに機能を満足する空間体→形態・表象に関する選択は設計主体に存在する場合が多い．このようなとき，設計主体にとって総合化とは，分析の結果得られるいくつかの可能な機能空間体(それはすでに3次元的な構造をもったもの)の中からアプリオリに，1つの形態・表象様式に最も適合するものを選び出すことが多い．建築家はこのプロセスを最も効果的に行うためにすでに彼ないし彼らに内在する1つの主張に従って，その選択を決定する．しかもその主張は設計の進め方そのものについての主張であり，設計の進め方そのものを哲学化しようとする傾向をもつ．B. Lawsonが述べているように[4)]，ある種の空間決定の問題を科学者と建築家にそれぞれ与えたとき，前者がいくつかの規則を探し求めそれを満足する解を提案する傾向，すなわち「problem-focused」なのに対し，建築家はいくつかの代替案をつくり，規則に

合うかどうかをテストする傾向がある．彼はそれを「solution-focused」と述べているが，ここに述べることは「solution-focused」から一歩踏みこんで，solution の意味，価値を問題にする「issue-focused」ともいうべき設計のモデルである．

現在数多い建築物の中で，いわゆる専門家の中で高い評価を受けるものには，単に「solution-focused」でなく「issue-focused」に焦点が合わされた設計プロセスの所産であるものが多い．これは先に歴史的展開の中で述べたイデオロギー，あるいは時に様式といってもよいものの有無が文化としての建築を評価するために欠かせない基準となっていることを意味している．したがって，今日では巨匠といわれた人たちの作品，そしてそれをつくっていく設計のプロセスを見るとき，その総合化は彼らによってアプリオリに確立された空間→形態・表象をあらしめる独自の建築哲学によって決定されたものが多い．

もちろんその哲学の優劣自体は文化的レベルにおいて評価されるものであるが，一方優れた哲学・主張は，多くの設計主体によって 1 つの方法にまで完成され，さまざまなデザインの問題，目的，状況に対応しうるようになる．そしてさらに経験と実験の蓄積を通してその方法を豊かなものにしていく．今日までの多くの建築家のデザイン・プロセスは，このような哲学－方法とデザイン・オブジェクトとの間の止揚と解釈してよい．このモデルにおいては合理的な分析，発展，解釈はつねに部分的にのみ使用され，それらは integrator にはならない．この方法の優れた面は，プロセス自体が神秘性を伴った明快性をもつことにある．と同時に後に述べる「探し出す」ということに重点をおいたモデルと比較したとき，遙かに効率的ですらある．

しかもすでに述べたように優れたアイディアは建築の「文化性」に寄与するところが大きい．しかし一方，このモデルはオプティマムな性能を具備することを目的とした建築物の設計に対しては必ずしも適当なモデルではない．つまりさまざまな価値をオプティマムに満足させるということは客観的に了解しうる最適解に限りなく近づくということであり，このようにアプリオリに設定された価値および決定機構はそうした目的のためには阻害要因になることもあるからである．こうした状況が，つねにつぎに述べるモデル II の存在理由にもなる．

なお，ある特定の個人・集団によるイデオロギーはそれが繰り返され，情報のネットワークの中で増幅されるに従って，様式化，またはファッション化→疲弊化というプロセスをたどって消滅する．しかしその中の優れたものは歴史の中にストックとして集積され，1つの知識として別な時代に再現され，あるいは変形された形で再び特定の個人・集団内にあらわれ，設計行為に参加するのである．

5.7.2 モデル II：Solution-oriented Model

建築設計においても，その多くは必ずしも上述のモデル I のように個性的，文化的に明快なものでなくてもよいし，また，モデル III でも述べるような新しさを通じての創造性を求める必要性も必ずしもあるわけではない．むしろさまざまな条件をオプティマムに満足させた帰結としての機能空間体のあり方をそのまま受容するか，あるいはその基本形を変えることなく付加的な価値を随時，加算したり，付着したりすることによって対応しようとする必要が起こる場合も多い．そのとき，現在われわれが所有しているさまざまな知識・情報等をどのように組み合わせて総合化を行うか，ということを設計の目的と決定したとき，このモデル II の存在理由が明らかになる．

すでに述べたように，その方法は，前に示した図 5.1 に近いものになり，ここで analysis→synthesis は，より大きな設計のプロセスの中の一部として組み入れられることになる．そこでは客観的に設定された評価のチェックがより厳しく設けられている．特にこの場合，設計方法論においては，「与条件」と「設計条件」を区別している．与条件は文字どおり与えられた条件であるが，設計条件はそれを十分にかみくだいて，自らの提案をも組み込んだ条件であり，設計主体によって決定される．それが設計条件をオブジェクト・ブリーフと呼ぶゆえんである．オブジェクト・ブリーフ，特に量産工業化住宅のように商品として開発され，かつ不特定多数の見込客を対象とし，しかも関連性のある生産システムや社会システムの変化にいたるまでオプティマムに条件 - 目的設定の中に組み込んでいく設計の場合，そこに投下される膨大なエネルギー・コストを考えてみても，その設計のプロセスはモデル I のようにアプリオリな信条とか確信をもつことで出発することは否定される場合が多い．システムという

点から見れば工業化住宅とインテリジェント・ビルの間には相似したものが見られるし，商品開発という視点に立てば，自動車，家電品の開発とも比較されよう．エポック・メーキングな新種開発でない限り，この場合のanalysis - synthesisはしばしばすでに存在する有効な型を発展的に改良，あるいはそれを模索への第1段階にすることによって作業がはじめられる場合が多い．

しかもそこで到達したsynthesisは，モデルIと違ってsynthesis 1に過ぎない場合が多い．すなわち，工業化住宅に見られるように，一度試作し，テストされた結果が条件・目的設定にフィードバックされ，つぎのanalysis - synthesisに向かうというプロセスが繰り返されることが往々にして存在するからである．このときsynthesis自体1，2，……，nという過程の中で理解されることになる．

このモデルを合理的なものとして運用していく上において重要なことは，どのくらい設計に関連してくる条件・設計上のさまざまな希望・目的が設計主体によって言葉，あるいは量的に説明しうるものに置き換えられるかということであり，またそれが設計主体によってどのくらい理解されているかということである．図5.2にあるように合理的ないしはシステマティックなデザイナとは人間コンピュータのようなものであり，彼はその総合化のプロセスで，入力されるあらゆる情報を一歩一歩与えられた順序に従って最適解を得るまで作業を行わなければならない．そのためには，つぎのいくつかの条件が整っているこ

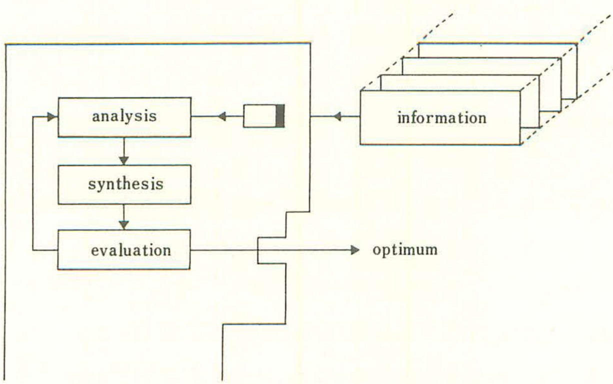


図5.2 コンピュータ・デザイナ

とが必要となる．

(1) デザインの目的，変数，クライテリアが先に明確に決定されていること

(2) 分析が解決に先立って完全に整っていること

(3) 評価が実験的というよりも，言語によって合理的に行われること

(4) デザインの戦略があらかじめセットされていること

こうしたアプローチは他の工学の諸分野の設計と類似した部分が多く，したがって互いに与える影響も大きく，きわめて興味のあるアプローチである．

しかし同時に，多くのデザインの問題は上に述べたような合理性を必ずしも与えられてはいない．すなわちさまざまな諸条件は設計主体の独断，偏見，主観なしに操作可能な要素に分解しうるかどうかに問題がある．たとえばコストの増減が建築物の美観に影響を与えるようなときに，美とコストという2つの価値の間に trade-off (量的比較による交換) が可能な決定機構がつくりうるか否かが問題になる．したがって最終的にはその効率のよい決定はある1人の設計主体に委ねざるをえなく，その1人は必ずしも客観的に最も正しい決定を下しうるとは限らないというような，モデルそのものの中に包含された矛盾を内包している．

5.7.3 モデル III：Search-oriented Model

以上述べた2つのモデルについて見ると，モデル I はきわめて演繹的 (deductive)，モデル II は帰納的 (inductive) であるとすれば，モデル III はそのどちらでもなく，むしろ analysis - synthesis のあり方自体をその設計プロセスの中で生みだしていく設計方法である．これはモデル I に比較して必ずしも効率がよいとも思えないし，またモデル II のように時間をかければ，オプティマムな解に一応到達しうるという保証もない．また設計主体のいかんによっては，見出されたものの出来，不出来はきわめて予想し難いものであるといった，きわめて不安定なプロセスでもある．

にもかかわらず，モデル I，モデル II に対してこのモデル III が相当なモデルであるという事実と，多くの建築家たちにとって魅力のあるモデルとして存在する理由は，現代の対象物である建築には絶えず革新性が要求されているという事実があるからであり，また建築が他の工業設計と同様に，時に創造性を

要求されることを併せ考えるときに明らかになるであろう※.

この場合，analysis - synthesis はモデル I，あるいはモデル II のようにはっきりしてはいない．したがって，そのプロセスは一応ある段階を踏むにしても，霧で覆われている部分が多い．したがってこの霧をぬぐいさるためには synthesis に向かう段階で「critical jump」がそのプロセスの中で発見されなければならないし，またそれがなるべく早くなされることが，その後に続く効果的なデザインの過程を展開するためにも好ましい．この「critical jump」が可能か否かは，先に述べたように設計主体をも含めたさまざまな条件の有無の存在のいかんによるところが大きい．すなわち，

(1) しばしば「critical jump」ないし「leap of insight」といわれる設計における創造の段階は，設定されたデザイン問題の中に所在しているがゆえに，たとえその中での一見なんでもない問題さえも重要な手掛りにしうる設計主体の強いデザイン・マインドが必要である．

(2) つぎにこうした critical jump はその特質として，それまで統合が不可能であったさまざまな要素・条件を一挙に synthesize する触媒として十分な機能をもつ必要性がある．そのためには，critical jump に至る過程で，その分析の段階においても十分設計主体によって問題の内容が把握されている必要性がある．と同時にそのデザイン問題が与えられた時点においてその地域社会に存在する一種の時代精神 (Zeitgeist) の所在に対する関心もまた重要性をもつ．何故ならば，モデル I において示したように，モデル III は，「探す行為：search」によって何かの発見を 1 つの目的としているからであり，また同時にその発見は必ずしも工学的発見だけでなく，文化的発見ともいうべき側面をつねに有しているからである．

(3) こうした critical jump の結果によって優れた結果をもたらした建築は少なくない．しかもそれらはどちらかというと現代において多いといえよう．

※たとえば工学の分野で研究所などが新しい製品の開発を試みるときに当面する模索の状態が該当するであろう．

5.8 むすび

先に述べたような3つのモデルについては，これらを等距離に見ることによってはじめて「建築設計とは何か」ということについておぼろげながらその本質について言及することができるのではないだろうか．すなわち，

(1) この3つのモデルはそれぞれ特有の合理性を有している．いま設計を行う人間を設計主体と考え，さまざまな与条件，現実を客体と見なそう．モデルＩにおいては主体の強い意思が客体の解釈，選択，その変容に強い指示力をもつ．したがって前に述べたように，統合のプロセスにおいて，他のモデルのような“迷い”はきわめて局部的に限定され，特に与えられた時間が少ないときには主体-客体という関係を保持しながら，一貫性のある1つの解を得ることができる．人々はその主体が客体のさまざまなレベルで関わり合ったプロセスを理解したときに，その建築を受容することがいっそう容易となり，さらにその主体のあり方に共感するとき，理解は高い評価となる．一方，客体が主体を優越すべきであると信ずるものにとって最も許容しやすいのはモデルII であろう．そこでは設計主体すらも客体化しようという意図が背後にある．そうした主体をいかに客体化しうるかというところにモデルII の目的があり，その一般性が合理性として評価される．

(2) しかし一方，こうした主体-客体の二元論を許容することなく，絶えず主体と客体の相対化を図ろうとするのも，もう1つの合理的方法といえよう．すなわち今日われわれの世界が部分性/全体性，地域性/国際性，感性/理性という二元論のもたらす矛盾を克服する1つの方法として，主体の客体化，客体の主体化を求めているとすれば，それはそれぞれの，他に対する優越性を前提とするモデルＩ，モデルII と異なった新しい合理性をめざしているにほかならないからである．この場合の主体とはもはや個人の中にそれぞれ存在する主体というよりも，ある集団の意思を具体化した主体であろう．

(3) 建築の大きな部分は「発明」でなく「発見」である．優れた設計とは，

その結果において，そうした時代と地域に存在する集団としての主体をいかに客体化し，また客体をいかに主体化するかの試みと作業でもある．そのときそこに存在する矛盾が克服されるという意味において集団の有する合理性を獲得するといってもよい．そして重要なことは“遊び”という行為すら，こうした新しい合理性の中で許容され，意味が与えられることである．それが建築設計の本質でもある．すなわち，歴史的に見るならば建築とは究極的に「いかに遊ぶか」という1つの文化行為にほかならないことを意味しているのである．

引用文献

1） 太田利彦，設計プロセスの意義．
2） 門内輝行，建築計画ニュース 007，日本建築学会，1984 年 7 月 20 日．
3） Rittel, H., *On the Planning Crisis,* 1972.
4） Lawson, B., *How Designers Think*（デザイナーはどのように考えるか），Eastview Press.

著者一覧（五十音順）

石井（いしい）威望（たけもち）（東京大学教授，工学部産業機械工学科）
小山（こやま）健夫（たけお）（東京大学教授，工学部船舶工学科）
菅野（すがの）卓雄（たくお）（東京大学教授，工学部電子工学科）
槇（まき）文彦（ふみひこ）（東京大学教授，工学部建築学科）
柳田（やなぎだ）博明（ひろあき）（東京大学教授，工学部工業化学科）

東京大学工学セミナー　工学における設計

1987年7月20日　初　版

[検印廃止]

編　者　猪瀬（いのせ）　博（ひろし）©

発行所　財団法人　東京大学出版会
代表者　菅野　卓雄
113 東京都文京区本郷7-3-1 東大構内
電話（811）8814・振替東京6-59964

組　版　株式会社永昌美術
印　刷　株式会社平文社
製　本　有限会社永澤製本

ISBN 4-13-060114-8

菅野 卓雄 編集代表	化合物半導体エレクトロニクス	B5判 240頁 2800円
庄野 克房	集積回路工学 トランジスタからマイクロコンピュータまで	A5判 206頁 2300円
石井威望 長尾高明 編	企業戦略とテクノロジー	46判 360頁 1800円
石井威望 編	経営戦略とイノベーション	46判 324頁 1600円
石井威望 編	高度情報社会の企業経営	近刊 1800円
加藤寛一郎	最適制御入門 レギュレータとカルマン・フィルタ	A5判 280頁 3800円
加藤寛一郎 大屋 昭男 柄沢 研治	航空機力学入門	A5判 280頁 3600円
加藤寛一郎 今永 勇生	ヘリコプタ入門	A5判 258頁 3600円
磯田 浩 鈴木賢次郎	図学入門 コンピュータ・グラフィックスの基礎	A5判 312頁 2900円
藤井 清光	石油開発概論[第2版]	A5判 232頁 2600円
本間 仁 監修 堀川清司 編	海岸環境工学 海岸過程の理論・観測・予測方法	B5判 598頁 13000円
秋山 宏	建築物の耐震極限設計[第2版]	B5判 336頁 6200円

ここに表示された定価は，物価の変動などにより
変更されることがありますので御諒承ください．

ISBN 4-13-060114-8 C3050 ¥2500E 定価2500円